BOLOMETRISCHE UNTERSUCHUNGEN
ÜBER
DIE ENERGIE DER RÖNTGENSTRAHLEN.

INAUGURAL-DISSERTATION
DER
HOHEN PHILOSOPHISCHEN FAKULTÄT (II. SEKTION)
DER
KÖNIGLICHEN LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT
ZU MÜNCHEN
ZUR
ERLANGUNG DER DOKTORWÜRDE

VORGELEGT AM 20. JUNI 1905

VON

ERNST ANGERER
AUS MÜNCHEN.

MIT VIER TAFELN.

ACAD. LOGRAT. BIBL.

LEIPZIG,
JOHANN AMBROSIUS BARTH.
1906.

Druck von Metzger & Wittig in Leipzig.

Die vorliegende Arbeit wurde vom Wintersemester 1904 bis zum Sommersemester 1905 am physikalischen Institut der Universität ausgeführt.

Es sei mir an dieser Stelle gestattet, meinem hochverehrten Lehrer, Herrn Geheimen Rat Röntgen, für die Anregung zu dieser Arbeit, für das große Interesse, das er meinen Untersuchungen entgegenbrachte, sowie für seine vielseitigen Ratschläge und Unterstützungen meinen ehrerbietigsten Dank auszusprechen.

München, Juni 1905.

Inhalt.

Seite

Einleitung 7

Erster Teil.

Nachweis der Wärmewirkung der *X*-Strahlen.

1. Beschreibung und Aufbau der Apparate 15
2. Qualitative Versuche mit *X*-Strahlen 26

Zweiter Teil.

Messung der Wärmewirkung.

1. Methode nach Rubens und Paalzow 30
2. Die Art des Heizstromes und seine Anwendung 37
3. Versuche über die Abhängigkeit der *X*-Strahlenenergie von der Primärstromstärke 55

Dritter Teil.

Nachweis der Proportionalität

der durch Sekundärstrahlen erzeugten Elektrizitätsmenge mit der bolometrisch gemessenen Energie der *X*-Strahlen 65

Vierter Teil.

Emissionsdauer der *X*-Strahlen 80

Schluß 84

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41552318_0029

Einleitung.

Nach der Entdeckung der *X*-Strahlen lag die Frage nahe, die Größe der mit diesen Strahlen fortgeführten Energiemenge zu bestimmen. Es sind nun vornehmlich zwei Wege, welche von den verschiedenen Forschern, die sich mit solchen Untersuchungen beschäftigten, eingeschlagen wurden:

1. Die Strahlen werden durch Metallbleche vollständig oder in einem bekannten Verhältnis absorbiert. Die Strahlungsenergie wird dadurch in Wärme verwandelt und die resultierende Wärmemenge nach irgend einer genügend empfindlichen Methode bestimmt.

2. Die sichtbare Strahlung eines unter den *X*-Strahlen aufleuchtenden Fluoreszenzschirmes wird mit einer Normallichtquelle verglichen, deren Energiewert bekannt ist.

Diese Methode verwendet Moffat[1]) in seiner Arbeit „über die Energie der Röntgenstrahlen". Er benutzt eine Influenzmaschine und schaltet vor die Röhre eine Funkenstrecke. Er findet, daß die *Größenordnung* der *X*-Strahlenenergie einer Entladung der Kondensatoren seiner Maschine 1,8 mg-cal beträgt.

Häufiger wurde die Energiebestimmung der *X*-Strahlen mittels der Wärmewirkung bei ihrer Absorption versucht. Die erste über Energiemessung der *X*-Strahlen veröffentlichte Arbeit rührt von Dorn[2]) her und benutzt diesen Weg. Dorn verband zwei symmetrische, verschlossene Glasrohre durch eine Töplersche Drucklibelle. Wurden in das eine der Rohre Metallbleche gebracht und diese dann den *X*-Strahlen aus-

1) A. Moffat, Sitzungsber. der phys.-med. Soc. Erlangen **30.** p. 70 bis 75. 1898.

2) E. Dorn, Wied. Ann. **63.** p. 160. 1897.

gesetzt, so beobachtete er einen Ausschlag an der Libelle. Durchsetzten die Strahlen das Rohr, *ohne* absorbiert zu werden, so wurde kein Ausschlag wahrgenommen. Die Erwärmung der Metallbleche durch einen konstanten Strom von bekannter Stärke ermöglichte die Messung der entstandenen Wärmemenge. So wurde die Energie der Gesamtstrahlung bei einer Entladung zu 0,30 mg-cal berechnet, die Energie, die eine andere *X*-Strahlenröhre ausstrahlte zu 0,18 mg-cal — wozu noch eine kleine Korrektion (etwa $^1/_7$) wegen Absorption in verschiedenen Aluminiumblechen anzubringen war. Im ersten Fall fand ein älteres, größeres, im zweiten ein kleineres neues Induktorium Verwendung.

Die zweite Arbeit dieser Klasse rührt von Schöps, einem Schüler Dorns her.[1]) Schöps bediente sich erstmals zu dieser Strahlungsmessung des Langleyschen *Bolometers*, welches einige Jahre früher durch Lummer und Kurlbaum[2]) als Flächenbolometer ausgebildet worden war. Die verwendeten Bolometer bestanden aus 0,02 mm dickem Platinblech, welches zickzackförmig ausgeschnitten war und so zwölf Streifen bildete. Die Länge eines Streifens betrug 35 mm, seine Breite 1 mm, der Zwischenraum zwischen zwei Streifen 1,5 mm. Die den Strahlen zugekehrte Platinfläche betrug 4,2 cm². Vier solche Gitter waren als Wheatstonesche Brücke geschaltet, von der zwei gegenüberliegende Zweige bestrahlt werden konnten. Die vier Bolometer standen in einem mit Stanniol belegten Holzkasten, später Eisenkasten, der innen mit Watte und Stanniol ausgelegt war. Die Seite, durch welche die Strahlung ihren Eingang fand, war mit 2,5 mm starkem Bleiblech bedeckt, in welchem sich eine runde, mit dünnem Aluminiumblech verschlossene Öffnung befand. Ein zweites Aluminiumschutzblech, das 5 mm von der Kastenwand entfernt war, genügte nach Dorn[3]) vollständig, um die Wärmestrahlung der erhitzten Röhre abzuhalten. Eigene Versuche, die dieses bestätigten, werden nicht beschrieben. Es ergab sich „sofort, bei einem

---

1) K. Schöps, Zeitschr. f. Naturw. **72.** p. 145—196. 1899; Dissertation Halle 1899.

2) F. Kurlbaum, Wied. Ann. **46.** 1892; **51.** 1894; **61.** 1897.

3) E. Dorn, Wied. Ann. **63.** p. 165.

ersten, orientierenden Versuch das Vorhandensein einer Wärmewirkung der Röntgenstrahlen". Inwieweit der Ausschlag des Galvanometers etwa durch andere Einflüsse bedingt war, untersuchte Prof. Dorn selbst mit folgendem Resultat:

„Es existiert keine merkliche Induktionswirkung des Magnetismus und des Akkumulatorenstromes auf die Apparate; dagegen finden elektrostatische Ladungen ... des Stromkreises statt," — die „fast vollständig" durch eine Erdleitung von 51000 Ω, parallel zu dem Galvanometer geschaltet, beseitigt werden.

Um die entstehende Wärmemenge zu messen, machte Schöps folgende Überlegung:

Aus der Ablenkung des Galvanometers, aus dem Strom, welcher durch dasselbe fließt, läßt sich die Widerstandsänderung des bestrahlten Bolometerzweiges gegen den unbestrahlten berechnen. Kennt man den Temperaturkoeffizienten, so kann man hieraus die Temperaturerhöhung berechnen, und man findet aus der Masse der Bolometer und ihrer spezifischen Wärme die am Ende der Bestrahlung in den Bolometern *vorhandene* Wärmemenge. Von der Wärmemenge, die bei der Absorption der X-Strahlen entsteht, wird aber ein Teil von den erwärmten Bolometern ausgestrahlt. Dieser Teil ist gleich der Fläche der Bolometer multipliziert mit dem äußeren Wärmeleitungskoeffizienten. Diesen zu bestimmen dient der zweite Teil seiner Arbeit. Eine Gruppe von Untersuchungen benutzt dazu die Methode von Kurlbaum[1]), Steigerung des Prüfstromes um einen bekannten Betrag; eine zweite Gruppe die Methode von Paalzow und Rubens[2]), Doppelbrücke mit Wechselstrom, allerdings ohne daß die Namen dieser Forscher genannt werden.

Schöps erhielt als Resultat der Gesamtstrahlung bei einer Unterbrechung als Mittel aus vier Röhren, deren Werte nahe beieinanderliegen, 0,195 mg-cal, ohne Berücksichtigung der Absorption in den Aluminumschirmen.

Ein Jahr später erschienen ausgedehnte Experimentaluntersuchungen von E. Rutherford, Macdonald und

1) F. Kurlbaum, Wied. Ann. **65.** p. 746. 1898.
2) A. Paalzow u. H. Rubens, Wied. Ann. **37.** p. 529. 1889.

McClung[1]), welche sich auch mit diesem Thema beschäftigen, ohne daß jedoch die Arbeit von Schöps erwähnt wird. Rutherford arbeitet mit Bolometern, die für seinen Zweck besonders günstig gebaut sind. Sie bestehen aus etwa 3 m langen, 5 mm breiten und 0,03 mm dicken Platinbändern, welche um einen Glimmerrahmen gewickelt sind. Die Platinfläche, welche den Strahlen zugekehrt ist, beträgt 92 cm^2, der Widerstand eines Bolometers 4,2 Ω. Doch sind, im Gegensatz zu Schöps, nicht vier sondern nur zwei solche Bolometer vorhanden, welche nebeneinanderliegende Zweige einer Wheatstoneschen Brücke bilden und von denen eines bestrahlt wird. Die beiden anderen Zweige bestehen aus Manganindraht. Die Bolometer stehen nicht voreinander, sondern nebeneinander, so daß die das erste Bolometer durchdringenden *X*-Strahlen in einen abgeschlossenen Raum gelangen können, um dort die Luft zu ionisieren. Die Ladung, die in dieser ionisierten Luft von einer geladenen Kondensatorplatte auf eine mit einem Elektrometer verbundene Kollektorplatte übergeht, wird gleichzeitig mit der Wärmewirkung gemessen.

Es findet ein Wehneltunterbrecher Verwendung, der in der Sekunde etwa 57 Unterbrechungen macht. Um gleichmäßige Strahlen zu erhalten, wird die Röhre $^1/_4$ Stunde vor jeder Beobachtung in Betrieb gesetzt und eine Funkenstrecke von ca. 12,5 cm parallel geschaltet. Die Röhre war so hart, daß diese Funkenstrecke in schneller Aufeinanderfolge durchschlagen wurde. 10 Sekunden nach dem Einschalten der Röhre wurde die Antikathode glühend. — Der beobachtete Ausschlag betrug im Mittel 18 mm. Wurden die Strahlen durch Blei abgeblendet, so ließ sich kein Ausschlag konstatieren.

Um die durch die Absorption der Strahlen erzeugte Wärmemenge zu messen, machte Rutherford verschiedene Versuche, die zu keinem guten Resultate führten. Die endgültigen Messungen wurden mit folgender Schaltung gemacht (Fig. 1).

---

1) E. Rutherford, Macdonald u. McClung, Philosophical Transactions **196.** A. 1901; Proc. Roy. Soc. **67.** p. 245—250. 1900; Physik. Zeitschr. **2.** p. 53—55. 1900.

Es wurde der Schlüssel I geschlossen und die Ruhestellung des Galvanometers G notiert. Dann I geöffnet, der Heizstrom durch II geschlossen nnd seine Stärke bei A abgelesen. Nach einer bestimmten Zeit, 30 oder 45 Sekunden II wieder geöffnet, I geschlossen und die Ablenkung des Galvanometers G gemessen. Die Verteilung des Stromes auf den Zweig B_1 wird in Rechnung gezogen. Nachdem festgestellt ist, daß die Ausschläge des Galvanometers mit genügender Annäherung mit dem Quadrat der Heizstromstärken wachsen, kann der Heizstrom, welcher einen gleichen Ausschlag hervorbringt, wie die X-Strahlen durch Interpolation ermittelt werden.

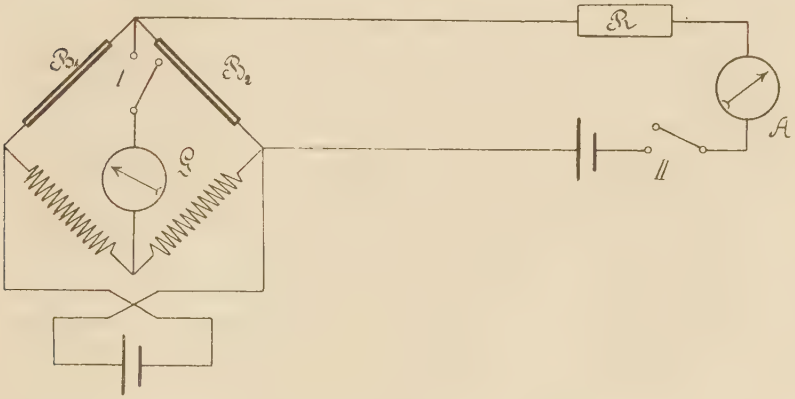


Fig. 1.

Versuche, die von einer Thermosäule absorbierte X-Strahlenenergie mit der Strahlung einer Hefnerlampe zu vergleichen, hält Rutherford nicht für genügend streng, da die X-Strahlen bis zu 1 mm in das Metall eindringen, die Wärmestrahlen dagegen schon an der berußten Oberfläche absorbiert werden. Das absorbierende Metall kühlt sich daher nach der Bestrahlung mit Licht schneller, als nach der mit X-Strahlen ab.

Aus den von Rutherford mitgeteilten Zahlen berechnet sich die Gesamtstrahlung einer Röhre bei einer Entladung zu 0,193 mg-cal/sec., eine Zahl, die mit der von Schöps gefundenen fast vollständig übereinstimmt.

Die letzte Arbeit, welche mit dem Bolometer die Energie der X-Strahlen zu bestimmen versucht, ist von Leininger

veröffentlicht.[1]) Nach einigen eigenen Versuchen hielt sich Leininger genau an die Angaben von Rutherford, ohne jedoch bei hoher Empfindlichkeit seiner Apparate irgend eine Wirkung bekommen zu können. Er schloß aus seinen Versuchen, „daß die von ihm benutzten Röntgenröhren keine Wärmewirkung zeigten“ — jedenfalls dürfte nach seinen Angaben die Wärmewirkung höchstens $^1/_{20}$ der von den anderen Forschern beobachteten betragen.

Endlich muß hier ein Versuch von W. Wien erwähnt werden[2]), der auf rein theoretischem Wege die Energie der *X*-Strahlen zu bestimmen sucht und dieselbe *sehr gering* findet. Unter der Annahme, daß die Tiefe, bis zu der ein Elektron in das Material der Antikathode geschleudert wird, 10^{-5} mm betrage, sowie daß durch die Röhre ein Strom von 1 Milliamp. gehe, berechnet er die Energie der Gesamtstrahlung zu *0,03 mg-cal/sec.* Macht man die Annahme, daß die Eindringungstiefe der Elektronen geringer ist, so vergrößert sich der Wert der Strahlung.

Es stehen also die Resultate der neuesten Arbeiten in einem direkten Widerspruch mit den älteren Experimentaluntersuchungen und es schien erwünscht, mit den modernsten Apparaten aufs neue die zweifelhaft gewordene Wärmewirkung der *X*-Strahlen zu bestimmen und sie womöglich zu Energiemessungen derselben auszunutzen.

Die zu erwartende Wärmewirkung war jedenfalls sehr klein. Es schien daher nötig, eine der empfindlichen elektrischen Methoden anzuwenden, Thermosäule oder Bolometer. Die Anwendung der Thermosäule ist nach Rutherford ernsten Einwendungen ausgesetzt, andererseits waren mit dem gleichkonstruierten Bolometer die positiven Resultate Rutherfords, die negativen Leiningers gewonnen worden. Aus diesen Gründen schien es uns wichtig und interessant, die klassische Methode zur Messung schwacher Wärmestrahlung, die *bolometrische Methode* zu versuchen.

Das Prinzip des Bolometers ist folgendes: Der elektrische Widerstand eines metallischen Leiters wächst mit steigender

1) F. Leininger, Physik. Zeitschr. **2.** p. 691. 1901.
2) W. Wien, Physik. Zeitschr. **5.** p. 128. 1904.

Temperatur. Da man in der Brückenschaltung von Wheatstone ein Mittel an der Hand hat, mit großer Empfindlichkeit kleine Widerstandsänderungen zu bestimmen, so kann man daraus auf kleine Temperaturschwankungen schließen, welche jene hervorbringen können. Aufgabe der experimentellen Anordnung ist es, die Empfindlichkeit möglichst zu steigern.

Von Vorversuchen abgesehen, welche uns zeigten, wie schwierig die vielen Nebenerscheinungen auszuschließen sind, welche im übrigen jedoch ein vollständig negatives Resultat ergaben, lassen sich die vorliegenden Untersuchungen in vier Hauptteile zerlegen:

1. Die qualitative Feststellung, daß ein deutlich nachweisbarer Wärmeeffekt existiert.

2. Die Messung dieses Effektes durch Kompensation mittels eines Heizwechselstromes und die Bestimmung der Abhängigkeit der *X*-Strahlenenergie von der dem Induktor zugeführten Primärenergie.

3. Der Nachweis der Proportionalität der Wärmewirkung der *X*-Strahlen mit einer von Dorn und Curie angegebenen elektrischen Intensitätsmessung.

4. Die Bestimmung der Emissionsdauer von *X*-Strahlen bei einer Einzelentladung.

Erster Teil.

Die Vorversuche ergaben, daß folgende Prinzipien maßgebend für die Aufstellung der Instrumente sind:

1. Das Induktorium muß möglichst weit von dem Galvanometer entfernt werden, damit seine magnetischen Wirkungen unmerklich werden.

2. Die Leitung von dem Induktorium zu der *X*-Strahlenröhre soll möglichst kurz sein, um weder durch Kapazität noch durch Ausstrahlung allzu große Stromverluste zu erhalten.

3. Sämtliche hin- und hergehenden Leitungen des Bolometerkreises müssen dicht beieinanderliegen, weil sonst von dem Eisenkern des Induktors elektrodynamische Störungen erregt werden.

4. Sämtliche Leitungen müssen auf das sorgfältigste gegen die elektrostatischen Wirkungen der Röhre und ihrer Zuleitungen geschützt werden.

5. Die Kupferleitungen sollen einigermaßen, alle Verbindungsstellen dagegen sorgfältig isotherm gehalten werden, um die bedeutenden Wirkungen der Thermoströme abzuschwächen.

6. Die Bolometer sind so gut als möglich symmetrisch zu montieren und vor einseitiger Erwärmung zu schützen, welche eine stundenlang andauernde Wanderung des Skalenbildes hervorruft.

7. Endlich erwies es sich als nötig, alle Verbindungen, welche nicht gelötet werden konnten, auf das sorgfältigste aufzuschleifen und festzuschrauben, da sonst bei den geringsten Erschütterungen Widerstandsschwankungen auftraten, groß genug, um die Einstellung des Galvanometers um mehrere hundert Skalenteile zu verschieben.

Die Bedingungen 1 und 2 wurden bedeutend abgeschwächt dadurch, daß uns ein ganz neues Panzergalvanometer zur Verfügung stand — ein bedeutender Vorteil dieser Arbeit vor

den früheren. Wenn Induktor und Galvanometer in den entgegengesetzten Ecken des Zimmers, $6\,^1/_2$ m voneinander entfernt, aufgestellt waren, so betrug die magnetische Einwirkung des Induktors auf das ungeschlossene Galvanometer nur etwa $^1/_2$ Skt.

Forderung 3, 4 und 5 wurden erfüllt, indem für alle Leitungen mit Ausnahme des Elementzweiges der Brückenschaltung Starkstromlitzen verwendet wurden, welche gänzlich von Metallrohren umschlossen waren. Ähnlich waren auch die Schleifdrähte geschützt, welche eine genaue Abgleichung der Wheatstoneschen Brücke ermöglichten. Das Galvanometer war von einem Kasten aus Pappe umgeben, der mit Stanniol beklebt war.

Forderung 6 und 7 ließen sich durch Korrektion der entsprechenden Fehler leicht erreichen.

1. Beschreibung der Apparate.

1. *Die Bolometer.* Die für das Arbeiten mit dem Bolometer maßgebenden Prinzipien sind eingehend untersucht worden von Lummer und Kurlbaum.[1]) Die hauptsächlichen Bedingungen, welche von den beiden Forschern zur Erzielung möglichster Empfindlichkeit aufgestellt wurden, sind:

Die Widerstände der Bolometer sollen in jeder Beziehung möglichst gleich sein, die Luftströmungen einen möglichst bequemen Weg finden. Möglichst groß sollen sein: der Prüfstrom, der Temperaturkoeffizient, der bestrahlte Teil des Bolometers, der Absorptionskoeffizient. Möglichst klein dagegen: das Vermögen, die Wärme abzugeben, die Wärmekapazität, das Volumen des Bolometers und seine spezifische Wärme.

Die Bolometer bestanden genau wie bei Rutherford und Leininger aus Platinband von 0,03 mm Dicke, 5 mm Breite und etwa 2,5 m Länge. Dieses Band hatte ein Gewicht von etwa 7,3 g und wurde von einem Rähmchen aus Glimmer getragen. Die äußeren Dimensionen des Rahmens waren 100×96 mm^2, seine Breite betrug etwa 8 mm. Mit Hilfe einer Messingschablone waren aus dem oberen und unteren Rande des Glimmerrahmens Zacken von 1 mm Breite ausgefeilt, zwischen welche sich die einzelnen Platinwindungen schmiegten. Um sicher zu sein, daß nicht eine der hin-

1) O. Lummer u. F. Kurlbaum, Wied. Ann. **46.** p. 204. 1892.

laufenden Windungen eine zurücklaufende berühre, wurde in der Mitte des Rahmens, senkrecht zu der Windungsrichtung, ein dünnwandiges Kapillarröhrchen aus Glas durchgezogen, das die Vorderfläche von der Rückfläche trennte. Die Enden des Platinstreifens waren an rechtwinklig aufgebogene durchlochte Kupferbleche gelötet, welche sich sicher auf die dicken Zuführungsdrähte aufschrauben ließen. Die fertig gewickelten Rahmen konnten in Falze gesteckt werden, die in zwei auf einer Hartgummiplatte ($110 \times 160 \times 10$ mm) stehende Hartgummischienen gefräßt waren. Jedes Bolometer bot den Strahlen zwei Flächen von 61 cm^2 dar, die sich zum größten Teil überdeckten. Fig. 2 stellt eine Aufnahme eines Bolometers mit X-Strahlen dar. Es wurden vier Bolometer gefertigt, welche, um eine günstige Temperaturverteilung zu erzielen, hintereinander montiert wurden.

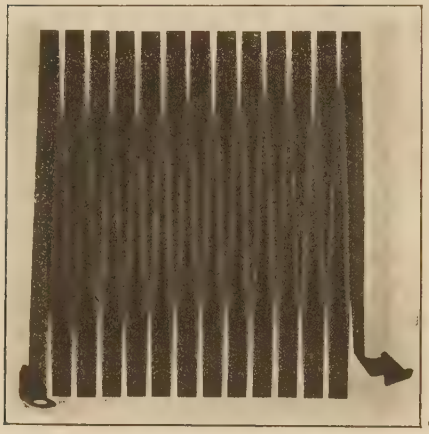


Fig. 2.

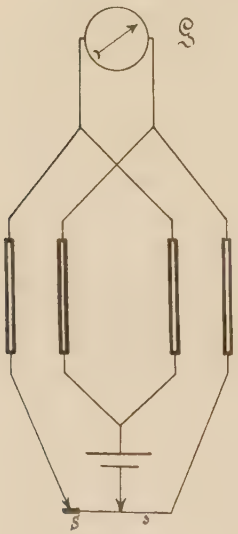


Fig. 3.

In der Art, wie dies von Lummer und Kurlbaum angegeben ist[1]), wurden sie als Wheatstonesche Brücke geschaltet (Fig. 3). Der Vorteil der Lummerschen Anordnung ist, daß zwei schräg gegenüberliegende Brückenzweige gleichzeitig bestrahlt werden können, wodurch der Ausschlag des Galvanometers beträchtlich vermehrt wird. Bemerkenswert ist, daß der variable Schleifkontakt nicht in den Galvanometerzweig, sondern in den Elementenzweig gelegt ist.

1) O. Lummer u. F. Kurlbaum, Wied. Ann. 46. p. 204. 1892.

Um die beiden hinteren Bolometer vor der Bestrahlung zu schützen, waren sie während des ersten Teiles der Arbeit durch einen flachen Bleikasten überdeckt. Die den Strahlen ausgesetzte Stirnfläche desselben bestand aus zwei Bleiblechen von zusammen 7,6 mm Stärke. Rück- und Seitenflächen waren aus 3 mm starkem Bleiblech gebildet und trugen oben und unten viele große Löcher, um eine genügende Zirkulation der Luft zu gestatten.

Es betrugen die Widerstände von Bolometer *A*: 1,90 Ω,
„ „ *B*: 1,83 Ω,
„ „ *C*: 1,83 Ω,
„ „ *D*: 1,88 Ω.

2. *Die Bolometerkasten.* Es ist notwendig, die Bolometer so gut als möglich gegen äußere, ungleichmäßige Wärmeeinflüsse zu schützen. Doch hat man beim Arbeiten mit *X*-Strahlen den großen Vorteil, daß diese mit Leichtigkeit Hüllen durchdringen, welche Wärmestrahlung und Wärmeleitung hindern.

Um einen Raum möglichst isotherm zu halten, empfiehlt es sich, ihn mit vielen Hüllen aus abwechselnd gut und schlecht wärmeleitendem Material zu umgeben, wobei die guten Leiter möglichst gut reflektieren sollen. Wenn die Temperatur des ganzen Raumes, in dem sich die Bolometer befinden, um ein geringes erhöht wird, so hat das fast keinen Einfluß. Zu vermeiden ist nur die *einseitige* Erwärmung.

Um diesen Prinzipien gerecht zu werden, wurde ein Kasten von 170 mm Höhe aus 1,5 mm starkem, blank verzinntem Eisenblech gefertigt, welcher fast luftdicht über die starke Hartgummiplatte, welche die Bolometer trug, geschoben wurde. Wenn auch die magnetischen Schirmwirkungen dieses dünnen Bleches geringer sein dürften, als dies Schöps anzunehmen geneigt ist, so erscheint doch Eisen geeigneter, als ein anderes Material. Ein umgebördelter Boden aus Weißblech, der durch zwei Schleiffedern mit dem Kasten leitend verbunden war, vervollständigte die Umhüllung. Zwei quadratische Fenster von 83 mm Seitenlänge wurden den Bolometern gegenüber in dem Kasten angebracht und mit Aluminiumfolie von 0,03 mm Dicke verschlossen. Endlich wurde an dem Bodenblech eine Erd-

leitung angebracht und festgestellt, daß ein Strom ohne merklichen Widerstand von der Folie der Fenster durch den Kasten in das Bodenblech ging.

Dieser Kasten wurde gänzlich in sogenannte Tafelwatte eingenäht, breite Wattestreifen, die auf beiden Seiten geleimt sind und mäßig gepreßt etwa 7 mm Dicke besitzen. Um die Watte kam ein zweiter Kasten aus etwa 0,4 mm starkem, blankem Weißblech mit denselben Aluminiumfenstern, um diesen wieder zusammengenähte Watte und endlich ein dritter Kasten aus demselben Weißblech, der Aluminiumfenster von 0,2 mm Stärke besaß. Die Dimensionen des äußersten Blechkastens waren: 160 × 210 × 200 mm. Jeder der Kästen war eigens zur Erde abgeleitet. Wie ausgezeichnet der Schutz gegen strahlende Wärme war, den diese Anordnung bot, soll später durch Versuche gezeigt werden.

Die fünf Leitungen, die zu den Bolometern führten, bestanden, wie erwähnt, aus Starkstromlitzen und trugen an ihren Enden angelötet durchlochte Kupferbleche, mit denen sie direkt auf die Verteilungsdrähte aufgeschraubt waren. Sie waren durch enge Löcher in den innersten Kasten gesteckt, welche durch Wachskitt luftdicht verschlossen wurden.

3. *Die Schleifkontakte.* Die Bolometer waren einander so ähnlich wie möglich hergestellt worden. Trotzdem war es nötig, zur genauen Abgleichung ein Stück Schleifdraht *s*, Fig. 3, in den einen Bolometerkreis einzuschalten.

Es war nun einerseits wünschenswert, ein Intervall von etwa $^1/_{10}\,\Omega$ zur Variation zur Verfügung zu haben, andererseits sollte der Draht nicht beträchtlich über 1 m lang sein. Bei diesen Dimensionen machte jedoch eine unmerkbar kleine Verschiebung des Schleifkontaktes schon viele hundert Skalenteile des Galvanometers aus. Da wir fürchteten, es möchte bei den geringen Unregelmäßigkeiten der Drahtoberfläche eine Verschiebung mit einer komplizierten Schraubenübertragung keine günstigen Resultate liefern, so versuchten wir das Prinzip der Donatschen Kompensationsbrücke anzuwenden.[1]) Bei dieser besteht der Schleifdraht aus zwei Teilen mit je einem Schleifkontakt. Der dünnere Teil mit größerem Widerstand

1) B. Donat, Wied. Ann. 58. p. 617. 1896.

entspricht genau unserem Abgleichungsdraht der Lummer-Kurlbaumschen Anordnung. Zu diesem hinzu wird nun ein mehr oder minder langes Stück eines zweiten Leiters S geschaltet (Fig. 3), der sehr viel weniger Widerstand besitzt, als der Abgleichungsdraht und dadurch der Widerstand der einen Hälfte um einen ganz geringen Betrag geändert. Dieser zweite Leiter besteht bei Donat aus Quecksilber, das sich in zentrischen Rinnen einer Hartgummischeibe befindet.

Ursprünglich wurden, um das Quecksilber zu vermeiden, Versuche gemacht, als zweiten Leiter einen Barren von Neusilber zu nehmen, 50 mm lang, $(3 \times 10)\,\mathrm{mm}^2$ Querschnitt, der mit dem Neusilberschleifdraht direkt verlötet wurde. So hofften wir sowohl Thermoströme zu vermeiden, als auch Vorteil aus dem geringen Temperaturkoeffizienten des Neusilbers zu ziehen. Eine Feder, die in viele kleine abgestumpfte Pyramiden auslief, umfaßte den Barren zangenförmig von oben und von unten. Sowohl der Barren als die Feder waren sorgfältig auf Glas abgeschliffen. Allein der Übergangswiderstand war trotz der saubersten Arbeit zu sehr von der Stellung der Feder abhängig, als daß der Apparat brauchbar gewesen wäre.

Es wurde nunmehr eine Art Weberscher Quecksilberwiderstand gefertigt. In ein kurzes dickes Glasrohr war unten eine Elektrode eingeschmolzen, die aus einem Platinscheibchen bestand, das auf einen Platindraht aufgeschweißt war. Das Glasrohr trug oben eine halbkugelförmige Erweiterung und wurde mit Quecksilber gefüllt. In dem Quecksilber war die zweite Elektrode vertikal verschiebbar. Sie bestand aus einem etwa 3 mm starken Kupferdraht, der bis auf seine Enden in ein Glasröhrchen mit Wachskitt eingegossen war. Das obere Ende trug die Zuleitung, das untere war gut amalgamiert und befand sich ständig unter Quecksilber. Diese Elektrode ließ sich an einer Führung mittels einer Schraubenspindel verschieben, welche nach Bedarf als Zahnstange oder als Mikrometerschraube gebraucht werden konnte.

Mit Hilfe dieses Widerstandes ließ sich jeder gewünschte Skalenteil einstellen. Nur wenn er längere Zeit ungebraucht gestanden hatte, zeigte sich manchmal ein Ausschlag in demselben Sinne, ob man etwas nach oben oder nach unten

drehte. Ein kräftiges Heben und Senken der Elektrode ließ die Erscheinung bald verschwinden.“

Der Schleifdraht bestand aus blankem Neusilber und lag auf einer schwachen eisernen T-Schiene, welche auf ihrer oberen Seite mit dünnem Hartgummi bedeckt war. Die Schiene hatte an jedem Ende eine dicke Hartgummischeibe, mit denen sie in einem 40 mm weiten, etwa 1 m langen Messingrohr festgeklemmt war. Das Rohr trug einen 900 mm langen, 5 mm breiten Schlitz parallel zu seiner Achse. Ein Stück eines schwächeren Rohres, etwa 100 mm lang, das glatt in dem ersten lief, konnte durch diesen Schlitz verschoben werden. Dieser Schlitten trug innen eine Feder aus hartem Neusilber, welche mit einer kreisförmigen stumpfen Schneide, die den Draht zur Hälfte umfaßte, die Zuführung des Stromes vermittelte. Meist bildete der Neusilberdraht eine Schleife, d. h. seine zweite Hälfte führte isoliert unter der Schiene zurück zu den beiden Enden der Kupferlitze. So waren erstens die beiden Lötstellen dicht beieinander, wurden gemeinsam in Watte gewickelt, mit Stanniol bedeckt und endlich durch die Schlußkappe des Rohres vor einseitiger Erwärmung nach Möglichkeit geschützt. Weil zweitens die hin- und herlaufenden Stücke des Drahtes dicht beieinanderlagen, wurden magnetelektrische Nebenerscheinungen beseitigt; das Messingrohr endlich, das Gehäuse des Ganzen, wurde geerdet und hielt so elektrostatische Störungen ab.

Als es später die immer mehr verbesserten thermischen Schutzvorrichtungen gestatteten, das Intervall des Meßdrahtes, in welchem die Nullstellung des Galvanometers vorkam, zu verkleinern, wurden die Enden der Neusilberdrahtschleife nach Angabe von Lummer und Kurlbaum durch einen dünnen, kurzen Draht verbunden. Infolge dieses Nebenschlusses kann der Schleifkontakt um eine viel größere Strecke verschoben werden, bis an den Enden der Galvanometerleitung dieselbe Potentialdifferenz herrscht.

4. *Das Galvanometer und seine Aufstellung.* Ganz hervorragend trug zu dem Gelingen der Arbeit das Kugelpanzergalvanometer nach du Bois bei.[1]) Wie bekannt, werden bei

1) H. du Bois u. H. Rubens, Ann. d. Phys. 2. p. 84. 1900.

dieser Konstruktion äußere magnetische Einflüsse durch drei Stahlpanzer auf fast $^1/_{1000}$ herabgemindert. Die beiden inneren umschließen als konzentrische Kugeln mit rechtwinklig gegeneinander versetzter Naht das kleine Magnetsystem, der äußere Panzer bildet einen Zylinder mit zwei horizontalen Deckeln und umschließt das ganze Instrument.

Um das Galvanometer vor horizontalen Schwingungen der Unterlage zu schützen, wurde die nach W. Julius benannte Aufhängung angewandt.[1]) Dieselbe besteht aus einem Gestell, das an drei langen Stahldrähten, die oben von einem Punkte aus gehalten werden, aufgehängt wird. Da die Schwingungen der Mauer viel rascher sind als die Schwingungen dieses langen Pendels, so werden sie bedeutend gedämpft, etwa auf $^1/_{1000}$ abgeschwächt.

Unter das schwebende Gestell wurde ein Wandbrett gebaut, welches ein Gefäß mit Paraffinöl für die Dämpferflügel des Gestelles trug. Ferner wurden auf diesem Brett drei sorgsorgfältig gearbeitete Schrauben angebracht, deren Spindeln genutete Messingteller trugen und sich so durch einen um alle herumgelegten Faden gemeinschaftlich drehen ließen. Diese Messingscheiben ließen oben in einer zentrischen Vertiefung die stählernen, eben abgeschliffenen Spindeln hervortreten. Ein geringes über diesen horizontalen Stahlflächen schwebten die konischen Stellschrauben des aufgehängten Gestelles. Es war nur nötig, mittels der Schnur die drei Spindeln gleichzeitig in die Höhe zu schrauben, um das Gestell zu arretieren.

Um das Magnetsystem ordentlich in das Galvanometer einzuhängen, verfuhren wir auf folgende Weise: Zunächst wurde mit besonderen Schrauben, die ein Verkürzen oder Verlängern jedes Aufhängedrahtes gestatten, das Gestell horizontal gerichtet, so daß eine kleine Libelle an demselben einstand. Dann wurde das Gestell durch Heben der Standschrauben arretiert und mit eigens angebrachten Schrauben wieder horizontal ausgerichtet. Nun wird das Galvanometer in das Gestell gesetzt, von allen Panzern befreit und der Galgen, der die Suspension zu tragen hat, herausgedreht. Das kleine Magnetsystem, das verwendet werden sollte, besteht aus zehn etwa 4 mm langen Magneten, die auf einen dünnen Aluminium-

1) W. H. Julius, Wied. Ann. 56. p. 150. 1895.

draht aufgekittet sind. An seinem unteren Ende trägt der Draht den runden Spiegel von etwa 4 mm Durchmesser. Der Draht ist an einem Quarzfaden aufgehängt, der oben an einer kleinen Messingspindel befestigt ist. Diese steckt man von unten in den Galgen, dreht ihn zurück und schiebt die eine Hälfte des innersten Panzers auf. Der Panzer trägt eine Bohrung, durch welche das Aluminiumstäbchen hindurchragt. Man dreht nun an den drei Stellschrauben des Galvanometers so lange, bis die Achse dieser Bohrung und die Achse des Drahtes zusammenfallen. Ist das geschehen, so wird das Galvanometer an dem Panzerboden des äußersten Panzers festgeschraubt, der zweite Teil des innersten Panzers aufgeschoben, die Richtmagnete werden aufgesetzt und der mittlere und der äußere Panzer montiert. Es empfiehlt sich, erstens alle *drei* Panzer zu benutzen, zweitens, die Astasierung des Instrumentes mit allen drei Panzern vorzunehmen, da sich bei dem Aufsetzen des letzten Panzers der Nullpunkt oft bedeutend ändert.

Die Torsionsköpfe der (inneren, kleinen) Richtmagnete tragen je eine Nickel- und eine Kupferschraube, welche die Pole der Richtmagnete anzeigen. Stellt man Nord zu Nord und Süd zu Süd und dreht dann die beiden Magnete, so folgt ihnen das Spiegelchen, bis es ansteht. Man kann es leicht so drehen, daß seine Normale auf die Skala zeigt. Dann werden die Pole scherenförmig auseinandergedreht, um die Richtkraft zu schwächen. Dabei dreht sich jedoch der Spiegel immer mehr nach der alten Lage zurück und ein Drehen der Magnetresultante hilft nur im Anfang. Deshalb wird man bei dem zweiten Versuch ein Stück über dem gewollten Nullpunkt hinaus anfangen und die Richtkraft schwächen, bis der Nullpunkt erreicht ist. In unserem Falle zeigte sich, wenn man allzuweit über den späteren Nullpunkt hinausging, daß der Spiegel beim Auseinanderdrehen der Magnete langsam dem Nullpunkt zuwanderte, aber, bevor er ihn erreicht hatte, umschlug. Es war nun einzig das Ziel vieler Versuche, eine Anfangsstellung der Richtmagnete zu finden, welche ein möglichst weitgehendes Auseinanderdrehen, Astasieren, gestattete, ohne daß der Spiegel umschlug — ein Ziel, das in kurzer Zeit erreicht wurde.

Bei einer Schwingungsdauer von etwa einer Sekunde muß das System durch einen schwachen Strom abgelenkt werden und mit Spiegel und Skala durch Kommutieren des Stromes die Torsionslosigkeit des Quarzfadens geprüft werden. Die Messingspindel, an welcher der Quarzfaden befestigt ist, hat oben einen Schnitt wie eine Schraube und man kann mit einem Schraubenzieher aus Messing diesen Schlitz erreichen und die Spindel drehen, *auch wenn das Instrument bis auf den oberen Panzerdeckel vollständig montiert ist.* Da man zugleich im Fernrohr kontrollieren kann, daß sich der Spiegel nicht nach unten verschiebe, erscheint dies eine einfache und sichere Methode, den Quarzfaden auszutordieren. Es beeinflußte in unserem Falle die geringste Drehung, die man mit dem Messingstift aus freier Hand machen konnte, bereits die Asymmetrie der Ausschläge.

Nach Beendigung der Astasierung wurde der obere Panzerdeckel aufgesetzt und das Galvanometer durch Senken der Standschrauben gehängt. Die äußeren Richtmagnete wurden nicht verwendet, ebensowenig ein schweres Bleigewicht, das von Siemens & Halske dem Galvanometer beigegeben wird, um den Schwerpunkt höher zu legen.

Die beiden Spulen des Galvanometers hatten 1125 und 1118 Windungen. Ihr Widerstand betrug 6,1 und 5,8 Ω. Bei einer Astasierung bis zu 5 Sekunden einfacher Schwingungsdauer und bei 2,80 Ω (Parallelschaltung) innerem Widerstand zeigte das Instrument eine Empfindlichkeit von 2×10^{-10} Amp. pro Skalenteil Ausschlag. Der Abstand der Skala von dem Spiegel betrug 2,6 m. Um das Bild im Fernrohr genügend hell zu bekommen, war eine besondere Anordnung zur Beleuchtung der Skala nötig. — Lästig war bei der hohen Empfindlichkeit nur die geringe Konstanz des Nullpunktes, der einerseits von der herrschenden Temperatur abhängig war, andererseits sich oft wochenlang stetig nach derselben Seite verschob und von Zeit zu Zeit eine neue Einstellung nötig machte. Vielleicht mochte der Temperaturkoeffizient der Panzer daran schuld sein, vielleicht eine ungleichmäßige Ausdehnung der Aufhängedrähte oder ähnliches.

Zum Schutz gegen mechanische und elektrische Einflüsse war das Galvanometer von einem Pappdeckelkasten um-

geben. Die Juliussche Aufhängung gestattete eine ruhige Ablesung auch bei stärkeren, probeweise hervorgebrachten Erschütterungen.

5. *Ballastwiderstände.* Um das Galvanometer zu schonen, waren Balastwiderstände erforderlich, welche nacheinander ausgeschaltet werden konnten. Der größte Widerstand sollte so bemessen sein, daß das Skalenbild noch in dem Fernrohr blieb, wenn der Schleifkontakt in der Mitte statt an einem Ende stand. Die Rechnung ergab, daß hierzu etwa 400000 Ω nötig seien. Zur Herstellung dieses Widerstandes wurde ein Glasröhrchen matt geschliffen, zwei Stellen platiniert und dort Zuführungsdrähte angelötet. Dann wurde mit dem Bleistift eine Graphitbrücke zwischen den beiden Stellen gezogen und gleichzeitig mit einem kleinen Zeigergalvanometer der Strom gemessen, den ein Akkumulator hindurchsenden konnte. Von Zeit zu Zeit wurde der Graphitweg blank poliert. Als der Strom die berechnete Stärke erreicht hatte, wurde das Röhrchen mit Schellackfirnis lackiert. Dadurch stieg der Widerstand auf etwa 500000 Ω und hielt sich genügend konstant auf dieser Höhe. Ein zweiter, ähnlicher Graphitwiderstand bekam 14000 Ω, zwei andere zu 450 und 35 Ω wurden aus Nickelindraht gespult. Alle Widerstände kamen in ein vollständig abgeschlossenes Messinggehäuse und konnten mit einem Handgriff der Reihe nach ausgeschaltet werden.

6. *Apparate zur Erzeugung der X-Strahlen.* Das Induktorium, das in dem ersten Teile der Arbeit verwendet wurde, war ein älteres Instrument von Keiser und Schmidt. Mit einem Turbinenunterbrecher gab es bei 40 Volt und 4 Amp. primär etwa 20 cm Funkenlänge. Der Unterbrecher war von der Allg. E.-G. bezogen und trug der rotierenden „Turbine“ gegenüber vier Segmente, die entweder alle oder paarweise benutzt werden konnten. So ließ sich in einem bestimmten längeren Zeitintervall die einfache oder die doppelte Anzahl von Stromschließungen und Stromunterbrechungen erreichen, *wobei jedoch die Dauer des einzelnen Stromschlusses immer gleich lang war.*

Die verwendete *X*-Strahlenröhre war von Siemens & Halske (Gundelach) und hatte ein regulierbares Vakuum.

Die Aufstellung der Apparate ist in Fig. 4 im Grundriß skizziert.

Induktorium *J* und Galvanometer *G* kamen in die entgegengesetzten Zimmerecken. Von den Sekundärklemmen des Induktors führte eine Leitung *H* von blankem Aluminiumdraht in 2,5 m Höhe entlang an zwei Hanfschnüren, die in Paraffin

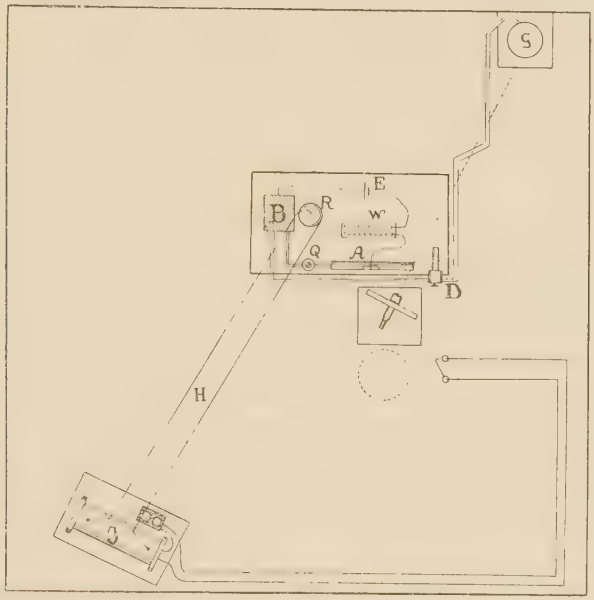


Fig. 4.

ausgekocht waren, bis zu dem Tisch, auf welchem die *X*-Strahlenröhre *R* ihren Platz hatte.

Dicht bei dieser, in einer Entfernung von 1—20 cm, war der Kasten mit den Bolometern *B* aufgestellt, von dem aus folgende Verbindungen gehen: durch den Quecksilberwiderstand *Q* hindurch zu dem Abgleichungsdrahte *A* und von da durch den eingeschalteten Rheostaten *W* und den Akkumulator *E* zu *B* zurück; ferner durch die Ballastwiderstände *D* zu dem Galvanometer *G*. Sämtliche Litzen wurden vor ihrer Verwendung mit geschmolzenem Paraffin getränkt, um die Isolationsfähigkeit zu verbessern, und dann durch sogenannte Bergmannrohre gezogen — Röhren aus geteertem Papier, welche mit Messingblech überzogen sind. Die kurzen Stücke, wo die Litzen aus den Rohren heraustraten, waren mit Watte um-

wickelt und mit Stanniol bedeckt. Alle Rohre waren durch die Wasserleitung zur Erde abgeleitet.

Da die Ablesungen in bestimmten Intervallen gemacht werden sollten, wurde ein Uhrwerk besorgt, das mit einem Quecksilberkontakt an der Sekundenzeigerachse alle 15 Sekunden den Strom eines elektrischen Läutwerkes schloß.

2. Qualitative Versuche mit *X*-Strahlen.

Wenn die Brücke mit Hilfe des Galvanometers abgeglichen war, so blieb das Bild der Skala nicht längere Zeit bei derselben Marke stehen. Vielmehr zeigte sich, wie auch bei der hervorragenden Empfindlichkeit, vor allem wegen der Stärke des Prüfstromes zu erwarten war, ein langsames, ruhiges Wandern des Skalenbildes.

Zwei der Bolometer befanden sich, wie oben (p. 17) erwähnt, zum Schutze vor der Strahlung in einem Bleikasten. Dieser Mangel an Symmetrie rief langandauernde Störungen des Gleichgewichts hervor. Denn durch den Prüfstrom wurden die bleiumgebenen Brückenzweige anders erwärmt, als die freien, und dieser Unterschied glich sich erst schnell und dann immer langsamer aus, verkehrte sich auch oft, bei äußerer Abkühlung etwa, ins Gegenteil. Weil jedoch das Wandern, wie graphische Darstellungen erkennen lassen, ein sehr gleichmäßiges war, gestattete dieser Fehler doch ein genügend exaktes Arbeiten.

Die Versuche, welche mit dieser empfindlichen Anordnung gemacht wurden, lassen nun zweifellos eine deutliche Einwirkung der *X*-Strahlen auf die Bolometer erkennen, die einen Galvanometerausschlag im Sinne einer Erwärmung verursacht und der weder elektrostatische noch elektrodynamische Störungen zugrunde liegen.

Einige Stunden vor dem Versuch wurde der Prüfstrom geschlossen. Seine Stärke betrug gewöhnlich 0,24 Amp., er war also beträchtlich stärker als der Rutherfords. Zwar wurde durch einen schwächeren Prüfstrom das Wandern vermindert, aber in verhältnismäßig höherem Grade auch die Empfindlichkeit herabgesetzt. Deshalb ergab es sich als das beste, erstere Stromstärke beizubehalten.

Der Gang eines Versuches war sehr einfach: Nach einer Nullpunktsbeobachtung wurde das Galvanometer mit allen Ballastwiderständen eingeschaltet, dann die Brücke abgeglichen, der erste Ballastwiderstand ausgeschaltet, wieder abgeglichen und so fort, bis die volle Empfindlichkeit des Galvanometers eingeschaltet war. Dann wurde das Uhrwerk in Gang gesetzt und die Einstellung des Galvanometers alle 15 Sekunden mit dem Glockenschlag abgelesen und notiert. Waren so einige Kurvenpunkte gewonnen, so wurde der Turbinenunterbrecher eingeschaltet und endlich, mit einem Glockenschlag, das Induktorium in Gang gesetzt.

Die Expositionszeit war anfangs häufig 30 Sekunden, später stets 15 Sekunden. Zu exponieren, bis ein Gleichgewichtszustand erreicht wäre, das heißt, bis die Kurve unter Einwirkung der *X*-Strahlen der unbeeinflußten Kurve parallel geworden, schien wenig Vorteil zu gewähren. Denn dieser Gleichgewichtszustand sagt nur aus, daß Wärmeeinnahme und Wärmeabgabe gleich sind, wobei die letztere nicht bekannt und kaum zu berechnen ist. Die Höhe der Kurve nach kurzem Verlauf, nach 15—30 Sekunden zu extrapolieren, schien dagegen bei der regelmäßigen Gestalt der Kurven ziemlich genau zu sein.

Die Versuche wurden in Form von Kurven gebracht, weil sich so die Art der Beeinflussung deutlicher erkennen läßt. Taf. I u. II zeigt einige dieser Diagramme.

1. *Versuch mit X-Strahlen.* Von den vielen Versuchen, welche gemacht wurden, um die gesuchte Wirkung der *X*-Strahlen zu studieren, möge hier nur ein einziges Diagramm diskutiert werden: Versuch 19, Taf. I. Die ersten fünf Kurvenpunkte ($^5/_4$ Minuten) sind Ablesungen des Galvanometers vor der Bestrahlung. Unmittelbar nach der fünften Beobachtung setzt die Bestrahlung ein und dauert die folgende Viertelminute. Die Kurve biegt unter diesem Einfluß nach $^1/_2$ bis 1 Sekunde um und verläuft steil nach unten. Als nach Ablauf der 15 Sekunden die Bestrahlung unterbrochen wird, steigt die Kurve erst schnell, dann langsamer und es stellt sich asymptotisch die frühere Temperaturverteilung wieder her. Leider ist bei diesem Versuch die Ruhe vor der Bestrahlung nicht vollkommen. Doch zeigt er im übrigen sehr deutlich

das charakteristische, momentane Eintreten der Wirkung wie auch den allmählichen Verlauf der Abkühlungskurve.

Zwei ungewollte Wirkungen könnten gleichfalls das Galvanometer ähnlich beeinflussen: die Strahlung der heiß werdenden Antikathode und die hohe elektrische Spannung an der Röhre. Daher wurde durch sorgfältige Kontrollversuche gezeigt, daß solche Nebenerscheinungen nicht existierten:

a) *Einfluß der Wärmestrahlung*: Versuch Nr. 15, Taf. I. Ein *Bunsenbrenner* wird in 18 cm Entfernung von dem äußersten Kasten angebracht und nach der fünften Beobachtung angezündet. Während die Wirkung der *X*-Strahlen fast momentan einsetzt, dauert es hier, wie aus der Kurve ersichtlich, $1^1/_2$ Minuten, bis der Wendepunkt eintritt. In diesem Moment wird die Flamme wieder gelöscht. Da sich aber die einzelnen *Hüllen* der Bolometer mit erwärmt haben, dauert die Wirkung noch lange nach dem Auslöschen der Flamme fort, bis endlich die Kurve ihre frühere Richtung wieder annimmt. — Über diese Kurve ist eine zweite gezeichnet, Versuch 16, Taf. I, welche zeigt, wie ganz anders die Wirkung der *X-Strahlen* sich darstellt. — Bei beiden Versuchen war das Wärmegleichgewicht vor dem Beginn der Bestrahlung sehr unvollständig, doch günstig für diese Versuche.

b) *Einfluß der hohen Spannung an der Röhre*: Bei einem Versuche (Versuch 7, Taf. I) wird die Röhre um 180° gedreht, so daß die Strahlung von den Bolometern fortgerichtet ist. Es läßt die Kurve bei dem Arbeiten der Röhre keine Ausbiegung erkennen.

Bei einem anderen Versuch (Versuch 11, Taf. I) werden die *X*-Strahlen durch Bleiblech vor den Bolometern abgeblendet. Es zeigt sich auch hier kein Ausschlag.

Die folgenden Versuche, die zu den quantitativen überleiten, können doch deren Genauigkeit nicht erreichen, da das gleichmäßige Arbeiten der Röhre in keiner Weise kontrolliert werden konnte.

2. *Versuch bei einfacher und doppelter Entfernung der Röhre von den Bolometern.* Da die Entfernung der Antikathode von den Bolometern nur angenähert gemessen werden konnte, dürfen diese Versuche keine große Präzision beanspruchen. Doch zeigte sich in befriedigender Übereinstimmung mit der Theorie

bei der doppelten Entfernung der Röhre von den Bolometern der vierte Teil des Galvanometerausschlages.

3. *Versuch mit vorgeschaltetem Platinblech* (Versuch 17, Taf. I). Ein Platinblech von 0,1 mm Dicke, das etwa der Dicke der durchstrahlten Bolometer entspricht, wurde in den Weg der *X*-Strahlen gestellt, bevor diese die Bolometer trafen. Der Ausschlag betrug $^1/_{11}$ des vollen Ausschlages. Die Härte der Röhre bei diesem Versuch ist nicht angegeben. Sie dürfte einer Schlagweite von 2,8 cm äquivalent gewesen sein.

4. *Versuche mit der einfachen und der doppelten Unterbrechungszahl.* Wie erwähnt ließ sich der Unterbrecher so einrichten, daß in derselben Zeit nur die Hälfte der ursprünglichen Unterbrechungen stattfanden, ohne daß die einzelne Schließungsdauer verändert worden wäre. Es wurden mehrere derartige Versuche unternommen, weil ihr Resultat ein unerwartetes war. Die Gruppe der Versuche 21 möge hier aufgeführt werden (Taf. I). Sie gibt das Resultat, daß die übermittelte Energie bei der halben Unterbrechungszahl nur $^1/_3$ der Energie bei der vollen Unterbrechungszahl ist. Die Versuche 18 und 19 ließen schließen, daß bei der anderen Schaltung nur $^1/_5$ der ursprünglichen Energie übermittelt werde. Der Wattverbrauch primär betrug nach Ausweis des Ampèremeters bei der zweiten Schaltung ziemlich genau die Hälfte.

Durch diese Versuche wird deutlich gezeigt, daß jene Wirkung der *X*-Strahlen, die bei den früheren experimentellen Arbeiten gefunden wurde, sich bei genügender Empfindlichkeit der Anordnung auch mit den neuen Röhrenmodellen erhalten läßt. Diese Wirkung ist sicher keine durch das Arbeiten des Induktors und der Röhre bedingte *Störung* und läßt sich — will man nicht unbekannte Widerstandsänderungen des Bolometermetalls annehmen — zwanglos als Absorptionswärme erklären.

Zweiter Teil.

Es schien am geratensten, möglichst bald die Fehler, die vor allem in der Asymmetrie der Bolometer lagen, auszumerzen und gleichzeitig zu einer Schaltung überzugehen, welche die Wirkung der X-Strahlen mit der gesetzmäßig festgelegten Wärmewirkung eines bekannten elektrischen Stromes zu vergleichen gestattet. Zugleich sollte die Intensität der X-Strahlen durch eine ihrer elektrischen Wirkungen kontrolliert werden.

1. Die Doppelbrücke nach Rubens und Paalzow.

Nach vielen Vorversuchen und Überlegungen entschlossen wir uns, die Bolometer zur Anwendung des Heizstromes nach der Methode von Rubens und Paalzow[1]) zu schalten.

In einer Wheatstoneschen Brücke soll ein Zweig von einem elektrischen Strome erwärmt werden, ohne daß dieser Strom irgendwie auf die anderen Zweige, besonders nicht auf das Galvanometer wirke. Dieses Problem lösen die beiden Forscher, indem sie jenen Zweig als eigene Wheatstonesche Brücke ausbilden. Es empfiehlt sich dabei, auch den symmetrisch gegenüberliegenden Brückenzweig als Wheatstonesches Trapez auszugestalten (Fig. 5). — Bei den Vorversuchen mit dieser Schaltung trat nun folgende Schwierigkeit auf:

Es kann die kleine Wheatstonesche Brücke so abgeglichen werden, daß an den Punkten C und D das gleiche Potential herrscht. In diesem Falle verhält sich die kleine Wheatstonesche Brücke der großen gegenüber wie ein einfacher Leiter. Man kann nun die große Brücke abgleichen und erhält einen Ausschlag des Galvanometers G, wenn sich

1) H. Rubens u. A. Paalzow, Wied. Ann. **37.** p. 529. 1889.

die Temperatur der kleinen Brücke durch das Fließen des Heizstromes ändert. Dieser Galvanometerausschlag soll während eines Versuches als Maß für die Temperaturerhöhung dienen. — Es läßt sich nun aber während des Versuches in keiner Weise kontrollieren, ob sich nicht, z. B. durch *ungleichmäßige* Er-

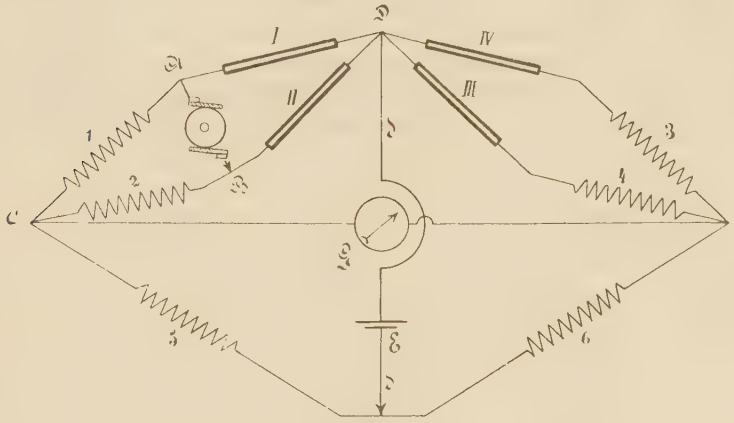


Fig. 5.

wärmung, die Abgleichung in der *kleinen* Brücke geändert hat, so daß der beobachtete Strom von dem Element in der kleinen Brücke geliefert wird. Vorversuche zeigten, daß sich im Laufe einiger Minuten häufig die Abgleichung der kleinen Brücke änderte — genügend, um starke Ausschläge des Galvanometers zu veranlassen.

Damit nun das Galvanometer wohl durch den Prüfstrom, nicht aber durch den Heizstrom abgelenkt werden könne, wurde als Heizstrom — wie schon bei Schöps — ein möglichst symmetrischer *Wechselstrom* verwendet, dessen Darstellung später beschrieben wird.

Ausführung der Rubens-Paalzow-Schaltung.

Zur Ausführung der Doppelbrücke nach Rubens und Paalzow wurden nur die vier bereits gefertigten Bolometer verwendet. Alle übrigen Zweige bestanden aus Nickelindraht.

Die Bolometer *I*, *II*, *III*, *IV* waren angebracht, wie es die Fig. 5 bez. Fig. 6 zeigt.

Vier Endpunkte der Bolometer waren mit einer Kupferschiene verbunden, welche dem Punkte *D* entspricht. Von hier aus ging auch eine Litze, welche den Diagonalzweig *d* bildete und zu dem Akkumulator *E* führte. Die anderen Enden der Bolometerstreifen waren mit Kupferdrähten von etwa 3 mm Stärke verschraubt. Diese Drähte führten, mit Gummischlauch isoliert, durch alle Hüllen hindurch vertikal nach unten in den Raum, in welchem die Nickelinspulen 1—6 sich befanden.

Um zwei der Bolometer vor der Bestrahlung zu schützen, wurde zwischen ihnen und den vorderen Bolometern eine Blei-

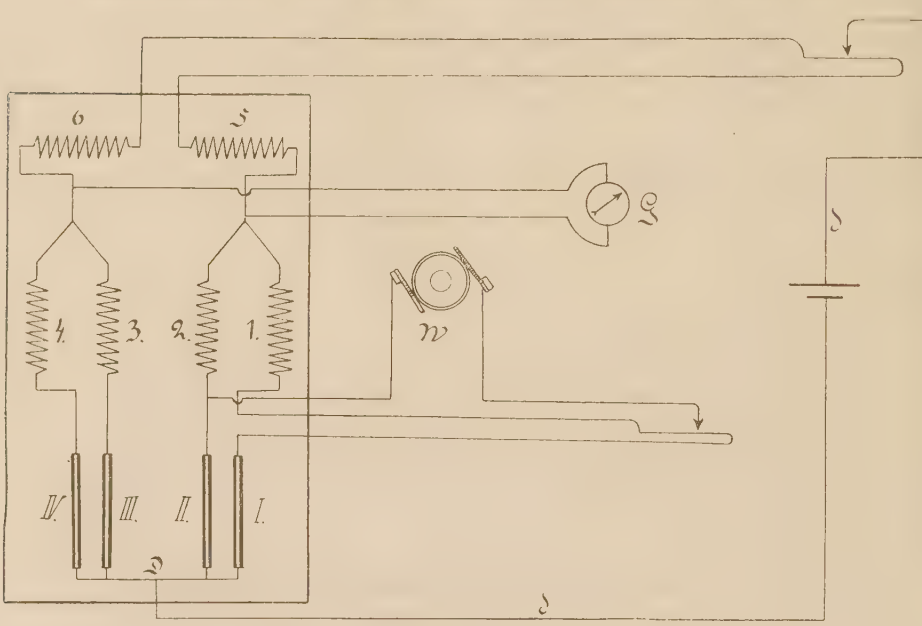


Fig. 6.

platte aufgestellt. Dieselbe war streng symmetrisch angeordnet und, um für die Wärme ein möglichst kleines Hindernis zu bilden, auf beiden Seiten rauh geschlagen und dann mit Lampenruß geschwärzt. Ihre Dicke betrug 6 mm.

Die Widerstandsänderung, welche durch den Heizstrom in den Nickelinspulen 1 und 2 erzeugt wurde, sollte vernachlässigt werden dürfen, da ja die entsprechenden Brückenzweige 3 und 4 von den *X*-Strahlen nicht beeinflußt wurden.

Das gestattete der geringe Temperaturkoeffizient dieses Metalles (zu ca. 1 Promille bestimmt), ferner die verhältnismäßig große Masse der Spulen. Jede Spule wog 134 g, der Draht war 1,5 mm dick, ohne Umspinnung und etwa 8 m lang. Der Widerstand der sechs Spulen betrug je 1,8 Ohm. Der Draht wurde auf der Drehbank gespult und die Spulen über ein Gerüst aus Messingstangen gezogen, von denen sie durch aufgeschobene Glasrohre isoliert waren. Die Messingstangen waren an beiden Enden in starkem Zinkblech festgeschraubt. Die Enden jeder Spule, welche hauptsächlich gegen Thermoströme geschützt werden mußten, befanden sich in der Mitte der ganzen Anordnung.

Das Gestell mit den Spulen wurde in einen Akkumulatorentrog gesetzt. Das Schema Fig. 6 zeigt die praktische Ausführung der Schaltung. Die einzelnen Leiter sind hier mit den gleichen Ziffern bezeichnet, wie in Fig. 5.

Auch diese ganze Anordnung mußte gegen die Einflüsse der hochgespannten Ströme des Induktors und der elektrostatischen Wirkungen der Röhre geschützt werden. Die zweite Abgleichungsbrücke wurde deshalb genau nach dem bewährten Muster der ersten hergestellt. Da die Röhre nun auf der anderen Seite des Bolometerkastens (vgl. Fig. 4, p. 25) montiert und außerdem mit einem starken Bleischirm umgeben wurde, versuchten wir jedoch zunächst einige Verbindungsdrähte ungeschützt zu belassen. Bei den ersten Versuchen zeigte sich nun folgendes: Fielen die *X*-Strahlen auf die Bolometer, so war ein unbestimmtes Schwanken der Skala, aber *kein Ausschlag* zu erkennen. Wurden die Strahlen dagegen abgeblendet, so resultierte ein Ausschlag. Nachdem die Leitungsschnüre in Bergmannrohre gelegt waren, verschwand diese Nebenerscheinung vollständig, während bei der Bestrahlung wie früher ein präziser Ausschlag erfolgte. Selbstverständlich war dieser Ausschlag viel kleiner, als bei der früheren Schaltung. Denn während dort zwei Zweige in demselben Sinne eine Ablenkung bewirken, ist es hier nur die Hälfte eines einzigen, zu dem noch ein anderer parallel geschaltet ist.

Wenn wir den Versuch machen, die erwärmende Wirkung der *X*-Strahlen durch die eines Stromes zu messen, müssen wir uns in erster Linie vergegenwärtigen, ob man diese beiden

Wirkungen miteinander vergleichen kann. Die Zeitdauer, während welcher von der Antikathode *X*-Strahlen ausgesandt werden, beträgt nach französischen Forschern $^1/_{10000}$ bis $^1/_{125000}$ Sekunde. Es folgt daher auf eine verhältnismäßig sehr kurze Zeit, in welcher Energie zugeführt wird, eine etwa 100 mal längere ohne Energiezufuhr. — Jeder dieser Impulse möge nun bei der Absorption momentan in Wärme verwandelt werden. Es ist anzunehmen, daß die Ausstrahlung unter diesen Umständen ein viel größerer Prozentsatz der zugestrahlten Energie fortführt, als wenn die Energie kontinuierlich zugeführt würde. Daß diese Unstetigkeit schon einen Unterschied zwischen Gleichstrom und Sinuswechselstrom ausmacht, wird durch eine Beobachtung von Schöps bestätigt, welcher den äußeren Wärmeleitungskoeffizienten bei Wechselstrom um 7 Proz. höher findet. Er legt jedoch seinen Berechnungen die Beobachtungen mit Gleichstrom zugrunde.

Es mußte nun eine Versuchsanordnung gefunden werden, welche einen Strom herzustellen gestattet, bei dem ähnlich,

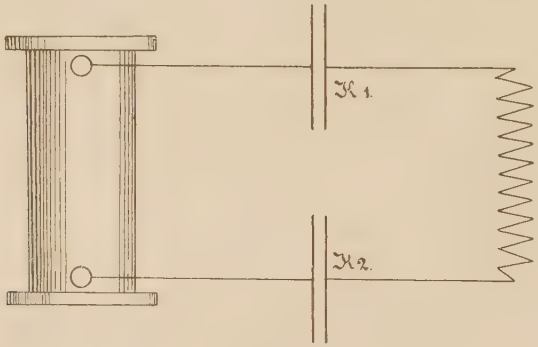


Fig. 7.

wie bei den *X*-Strahlen, sehr kurze Zeiten mit verhältnismäßig hoher Intensität durch einen längeren Zwischenraum getrennt sein sollten. Dazu erschien am geeignetsten das Induktorium selbst, weil dann die gleiche Zahl der Stöße verbürgt war. Außerdem sollte der entsprechende Strom, um keine Einwirkung auf das Galvanometer ausüben zu können, ein Wechselstrom sein, wie das bei der Besprechung der Brückenschaltung erklärt ist.

Zuerst versuchten wir, an jede Klemme der Sekundärspule einen Kondensator zu legen (Fig. 7).

Beim Betrieb des Induktors erhält jede Klemme bei jeder Unterbrechung für sehr kurze Zeit ein sehr hohes Potential. Ähnlich rasch ansteigende Werte der Spannungskurve müssen folglich durch Influenz auch die isolierten Kondensatorplatten K_1 K_2 aufweisen. Wurden diese beiden Platten leitend verbunden, so entstand in diesem Schließungskreis ein rasch verlaufender Wechselstrom. Vorversuche mit dieser Stromerzeugung mittels Influenz gaben indes keine günstigen Resultate — vor allem wegen der hohen Spannung und der geringen Stärke des erzeugten Stromes. Deshalb wurde eine Stromerzeugung mittels Induktion versucht.

Es wurde dazu ein Ring aus Kupferdraht gewickelt, der auf das herausragende Ende des Eisenkernes des Induktors geschoben werden konnte. Der Strom, welcher beim Öffnen und Schließen des Primärstromes in diesen Windungen erzeugt wurde, hatte die Form wie Fig. 8 zeigt. Dann wurde ein Kommutator konstruiert, welcher die Aufgabe hatte, diesen Induktionsstrom umzuformen. Er wurde auf die Welle des Turbinenunterbrechers montiert und lief synchron mit demselben. Der Kommutator unterdrückte die flachen Wellen unter der Abszissenachse, welche dem Schluß des primären Stromes entsprechen, und kommutierte die steilen Wellen. Das Stromdiagramm wäre nun etwa so wie Fig. 9. Die Breite dieser Wellen entspricht der Zeit, in welcher, nach dem Öffnen des Primärstromes die Kraftlinien des Eisenkernes die aufgeschobene Kupferdrahtspule durchsetzen, — und nach den Untersuchungen von Klingelfuss[1]) ist der Spannungsverlauf in der Induktionsspule ein äußerst rapider.

Bedauerlicherweise ließen sich jedoch mit dieser Anordnung keine Messungen ausführen.

Schaltete man direkt an die Induktionsspule ein ballistisches Galvanometer, so blieb dasselbe bei dem Betrieb des Induktors in Ruhe, bez. zitterte schnell und gleichmäßig um den Nullpunkt.

Wie aus energetischen Gründen selbstverständlich und

1) F. Klingelfuss, Ann. d. Phys. 5. p. 837. 1901.

durch einen eigenen Versuch erwiesen, geben *Schließung* und *Öffnung* des Primärstromes das gleiche $\int i\,dt$ in der Induktionsspule. Der Mittelwert dieses Wechselstromes ist also gleich Null. Anders verhält sich dagegen der Wechselstrom, der

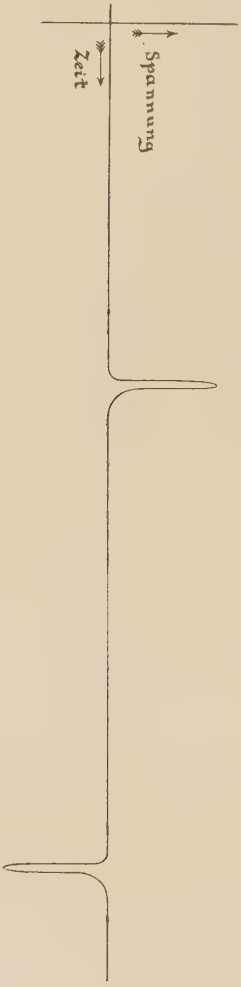


Fig. 9.

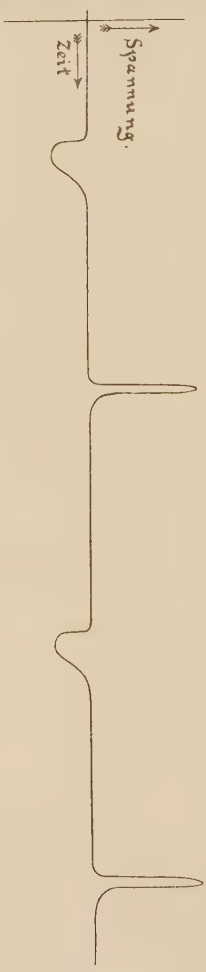


Fig. 8.

von den Klemmen des Kommutators abgenommen wird. Hier ist eine Welle über der Abszissenachse der ihr folgenden unter der Achse nur dann flächengleich, wenn der Primärstrom durch den Turbinenunterbrecher beide Male in genau gleicher Weise

geschlossen und geöffnet wurde. Wenn daher auch die Annahme gerechtfertigt erscheint, daß auch hier der Mittelwert der Stromstärke sehr nahe gleich Null sei, so zeigte der Versuch mit dem ballistischen Galvanometer, daß starke Ausschläge bald nach der positiven, bald nach der negativen Seite vorkamen.

Endlich versuchten wir, einen Wechselstrom von dem gegebenen Diagramm mittels *Kondensatorentladungen* herzustellen, und dieser Weg führte zum Ziele.

2. Der Heizstrom aus Kondensatorentladungen.

Die Idee dieses Versuches ist folgende: Die Kollektorplatte eines Kondensators wird abwechselnd mit einer Batterie auf 100 Volt geladen und zur Erde abgeleitet. Die Kondensatorplatte desselben ist durch die Bolometer hindurch zur Erde abgeleitet. Dann fließt der Ladungs- und Entladungsstrom durch die Bolometer hindurch. Die Energie dieser Ströme, ihre Dauer und Kurvenform können nach bekannten Formeln berechnet werden.

Die Joulesche Wärme dieses Ladungs- und Entladungsstromes verteilt sich auf den Schließungskreis dem Widerstande der einzelnen Leiterteile proportional. Der Teil der Wärmemenge, welcher auf die Bolometer trifft, kann also durch Einschalten eines variablen Widerstandes aufs genaueste reguliert werden. Bei dem Aufbau der Apparate war die leitende Idee: Die Verhinderung von oszillierenden Entladungen durch eine möglichst kleine Selbstinduktion der Leitung und einen verhältnismäßig großen Widerstand.

Nach einigen Versuchen wurde die Anordnung in folgender Weise getroffen (vgl. Fig. 10).

Die Elektrizitätsquelle H bestand aus zweimal 50 Hochspannungsakkumulatoren, die zu 100 oder 200 Volt geschaltet werden konnten. Von den Quecksilbernäpfchen der Batterie führte eine etwa 60 cm lange Litzenleitung ($a\,a$) von 4 mm^2 nach den Klemmen des Umschalters. In diese Leitung war, um einen eventuellen Kurzschluß der Akkumulatoren bei Verletzung der Isolation aufzuheben, eine Abschmelzsicherung (S) eingeschaltet, die aus einem 3 cm langen und etwa 0,2 mm dicken Zinndraht bestand. Ein Versuch hatte gezeigt, daß

dieser Draht bei einer Stromstärke von $^1/_2$ Amp. durchschmolz. An die Enden der Litze waren je eine 16 kerzige Glühlampe (*G G*) für eine Betriebsspannung für 108 Volt angeschlossen, welche einen Widerstand von 1060 bez. 1130 Ω besaßen. *Glühlampen* waren wegen ihres kleinen Selbstinduktionskoeffizienten jedem anderen Vorschaltwiderstand vorzuziehen. Ladung und Entladung des Kondensators fand bei dieser Schaltung durch fast denselben Widerstand statt.

Hinter den Glühlampen kam der Umschalter (*I, II, III*), der von dem Turbinenunterbrecher getrieben wurde. Von ihm, bez. von dem Kondensator führte eine 5 m lange Leitung *b* von 4 mm² Litze zu dem Beobachtungstisch. Hier befand sich ein

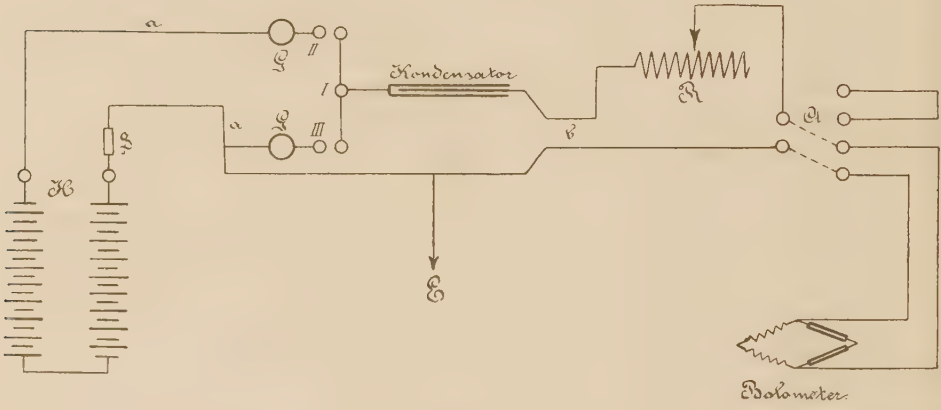


Fig. 10.

selbstinduktionsfreier Rheostat *R* von Edelmann, ferner ein bipolarer Ausschalter *A*, welcher beim Niederdrücken die Bolometer einschaltete, für gewöhnlich aber die beiden Pole durch ein Stück Kupferdraht kurz geschlossen hielt. Diese Anordnung war gewählt worden, weil es uns möglich schien, daß erst nach mehreren Entladungen ein stationärer Zustand sich herstellen könnte. Von diesem Ausschalter führte die Leitung direkt zu den Bolometern.

Der rotierende Umschalter bestand aus einem Hartgummizylinder *H* (Fig. 11), auf den ein Messingring *S* aufgetrieben war. Von diesem Ringe führten zwei Stifte nach unten zu zwei (in der Figur schraffierten) Messingsegmenten, die glatt in einen

Hartgummiring eingelegt waren, und von denen jedes $^1/_8$ des Kreisumfanges bildete. Der Abnehmer *I* schleifte auf dem Messingring, *II* und *III* auf dem Hartgummiring oder einem Messingsegment. *I* war mit der einen Belegung des Kondensators verbunden. *II* führte zu dem einen Pol der Batterie, *III* zu dem anderen und zu der Bolometerleitung.

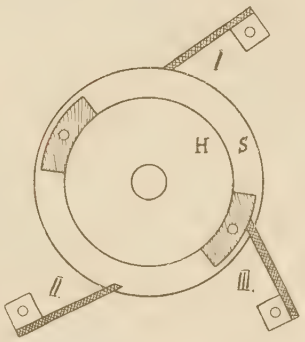


Fig. 11.

Stand *I* in Verbindung mit *II*, so lud sich der Kondensator durch die Bolometer hindurch. Kam *I* mit *III* in Kontakt, so erfolgte die Entladung gleichfalls durch die Bolometer.

Ein besonderer Vorteil war es, daß der Umschalter synchron mit dem Turbinenunterbrecher lief und daß infolgedessen beide Bolometergruppen, die bestrahlten und die durch Strom erwärmten, die gleiche Anzahl Energiestöße pro Sekunde erhielten.

Mehrmals wurde festgestellt, daß der Turbinenunterbrecher im Mittel 1605 Touren in der Minute machte. Da bei jeder Umdrehung vier Unterbrechungen bez. Heizstromstöße stattfanden, resultieren 107 Stöße in jeder Sekunde. Die Dauer, in der ein Segment den Abnehmer passiert, berechnet sich zu 0,00467 Sekunde.

Ein *Funken* des Umschalters war nur bei völliger Dunkelheit und zwar nur *vor* eingetretenem Schluß zu erkennen. Zur Berechnung der Stromkurve konnte es vernachlässigt werden.

Der Kondensator war ein Normalinstrument von Siemens und Halske und gestattete die Kapazität von $^1/_{10}$ Mikrof. bis 1 Mikrof. zu variieren.

Sandte man den Wechselstrom, der durch Ladung und Entladung des Kondensators entstand, durch ein empfindliches Galvanoskop von Hartmann und Braun, so blieb der Zeiger in der Nullstellung. Um zu prüfen, ob nicht in irgend einer unvorhergesehenen Weise das Galvanometer in der Brücke *direkt* durch den Heizwechselstrom abgelenkt wurde statt *indirekt* durch die Erwärmung, wurde das Galvanometer ein-

geschaltet, nachdem der Prüfstrom geöffnet worden war. Schaltete man jetzt in normaler Weise den Wechselstrom ein, so zeigte das Galvanometer *keine* merkliche Ablenkung.

In einem besonderen Versuch wurde die Güte der Isolation von Leitungen, Umschalter und Kondensator geprüft. Zu diesem Zweck wurde der Kondensator und seine Zuleitungen mit einem Braunschen Elektrometer verbunden und auf 210 Volt geladen. $^1/_2$ Stunde nach dem Abschalten der Batterie war das Potential auf ca. 130 Volt gesunken. Die Isolation ist demnach vollkommen zufriedenstellend.

Bei den ersten Versuchen, diesen Wechselstrom als Heizstrom für die Rubens-Paalzow-Schaltung zu verwenden, fanden wir, daß die Erwärmung der Bolometer — gemessen durch den Ausschlag des Galvanometers — der verwendeten Kapazität nicht proportional war.

Bei der Reihe 38 entsprachen z. B.

den Kapazitäten	0,2	0,4	0,6	0,8	Mikrof.
die Galvanometerausschläge . .	39	60	80	92	mm

Dabei war der in dem Rheostaten gezogene Widerstand 2000 Ω, der Gesamtwiderstand des Kreises, in den ja dauernd eine Glühlampe geschaltet blieb, folglich 3100 Ω.

Die Rechnung zeigte nun, daß bei so hohem Widerstand des Entladungskreises der Kondensator sich nicht genügend laden bez. entladen kann. Sinkt das Potential eines Kondensators mit der Kapazität C von dem Wert V_1 in der Zeit t auf den Wert V_2, wenn derselbe durch den Widerstand W geschlossen ist, so gilt die Beziehung

$$\lg n \left(\frac{V_1}{V_2}\right) = \frac{t}{W.C}\ ^{1)},$$

wobei in erster Annäherung angenommen ist, daß die Selbstinduktion des Schließungskreises vernachlässigt werden darf.

Berechnet man den Wert von V_1/V_2 für

$$c = 1 \text{ Mikrof.}, \quad t = 0{,}00467 \text{ Sek.}, \quad W = [3100]\ \Omega,$$

so findet man

$$\lg n \left(\frac{V_1}{V_2}\right) = \frac{4{,}67 \,.\, 10^{-3}}{10^{-15} \,.\, 3{,}1 \,.\, 10^{12}} = \frac{4{,}67}{3{,}1} = 1{,}5,$$

1) F. Kohlrausch, Lehrbuch d. prakt. Physik. 9. Aufl. p. 401

hieraus $$\frac{V_1}{V_2} = e^{1,5} = 4{,}5_1,$$

d. h. die Spannung an den Klemmen des Kondensators beträgt nach der Entladung noch ca. $^1/_5$ der Anfangsspannung. Man muß, um den Kondensator besser zu entladen, den Widerstand des Schließungskreises und gleichzeitig die Kapazität des Kondensators vermindern, so daß man in den Bolometern wieder dieselbe Wärmeentwickelung erhält. Die Rechnung zeigt, daß sich der Kondensator dann bis auf weniger als $^1/_2$ Proz. entlädt. Versuche, die auf diese Art angestellt wurden, ergaben dann auch die Proportionalität der Galvanometerablenkung mit der zugeschalteten Kapazität einerseits, mit dem reziproken Widerstand andererseits. Als Beispiel sei hier die Versuchsreihe 42 erwähnt. Sie ergab bei $^1/_{10}$ Mikrof. und den Widerständen

	1,5	2	3 tausend Ohm
die Ausschläge:	14	10	6,5 Skalenteile.

Zur weiteren Prüfung wurde in der Leitung *a* (Fig. 10) ein Präzisionsmilliampèremeter von Siemens und Halske geschaltet. Dasselbe zeigte bei den Widerständen:

1 500 Ω	2,7	5,6	8,5	11,5	14,3	17,1	22,3	26,9	Zehntel
11 000 Ω	2,4	4,3	5,2	5,8	5,95	6,0	6,1	6,2	Milliamp.
zugeschaltete Kapazität:	1	2	3	4	5	6	8	10	Mikrof. / 10

Man erkennt — besonders deutlich in der graphischen Darstellung, Taf. II, Fig. 1 — daß bei einem kleinen Widerstand des Schließungskreises die von dem Kondensator aufgenommene Elektrizitätsmenge proportional seiner Kapazität ist, daß dagegen bei einem hohen Widerstand eine Vergrößerung der Kapazität fast keine Vermehrung der aufgenommenen Elektrizitätsmenge hervorruft.

Um einen besseren Einblick in die vorliegenden Verhältnisse zu erlangen, soll der Versuch gemacht werden, den Verlauf der einzelnen Entladungen zu berechnen.[1])

Fließt in einem Stromkreis, der die Selbstinduktion L, den Ohmschen Widerstand R und die Kapazität C besitzt, ein

1) Bearbeitet nach: F. Bedell u. A. C. Crehore, Theorie der Wechselströme.

Strom i, der sich mit der Zeit t ändert, so läßt sich seine elektrische Energie

$$e\,i\,dt$$

in drei Teile zerlegen. Der erste Teil wird durch den Ohmschen Widerstand des Leiters in Wärme verwandelt und beträgt in der Zeit dt

$$R\,i^2\,dt.$$

Der zweite Teil wird als magnetische Feldenergie aufgespeichert. Die gegenelektromotorische Kraft, welche von dem magnetischen Feld aus auf den Strom im Leiter wirkt, ist $L.di/dt$. Die Arbeit, welche der Strom leistet, um diese Kraft zu überwinden, ist gleich dem Produkt aus dieser elektromotorischen Kraft, dem entstehenden Strome und der Zeit dt, also gleich

$$L\cdot\frac{di}{dt}\cdot i\cdot dt.$$

Nimmt der Strom zu, so leistet er positive Arbeit und die Feldenergie nimmt zu. Nimmt der Strom ab, so wandert die Feldenergie in den Leiter zurück und sucht den Strom aufrecht zu halten.

Der dritte Teil der Energie endlich wird zur Ladung der Kapazität C verwendet. Die Energie E eines Kondensators, auf dem sich die Elektrizitätsmenge q befindet und dessen Belegungen die Potentialdifferenz V besitzen, ist

$$E=\tfrac{1}{2}\,q\,V=\tfrac{1}{2}\,C\,V^2 \quad \text{oder} \quad =\tfrac{1}{2}\,\frac{q^2}{C}.$$

Der Teil der Energie, welcher in der Zeit dt die Ladung des Kondensators ändert, ist

$$\frac{dE}{dt}\,dt=\frac{q}{c}\cdot\frac{dq}{dt}\,dt.$$

Da ferner

$$dq=i\cdot dt \quad \text{und} \quad q=\int i\,dt,$$

so wird

$$\frac{dE}{dt}\,dt=\frac{i\,.\,dt\int i\,dt}{C}.$$

Diese drei Teile sind zusammen der Gesamtenergie gleich. So resultiert die Gleichung:

(IA) $$e\,i\,dt=R\,i^2\,dt+L\,i\frac{di}{dt}\,dt+\frac{i\,dt\int i\,dt}{C}$$

oder, durch Eintragen von

$$i = \frac{dq}{dt}$$

$$\text{(IB)} \qquad e\,\frac{dq}{dt}\,dt = R\left(\frac{dq}{dt}\right)^2 dt + L\,\frac{d^2q}{dt^2}\,\frac{dq}{dt}\,dt + \frac{q}{C}\,\frac{dq}{dt}\,dt.$$

Dividiert man Gleichung (1A) durch $i.dt$, so folgt:

$$e = Ri + L\,\frac{di}{dt} + \frac{\int i\,dt}{C}.$$

Durch Differentiation nach t folgt:

$$\frac{de}{dt} = R\,\frac{di}{dt} + L\,\frac{d^2i}{dt^2} + \frac{i}{C}.$$

Und hieraus:

$$\text{(IIA)} \qquad \frac{d^2i}{dt^2} + \frac{R}{L}\,\frac{di}{dt} + \frac{i}{CL} = 1/L\,\frac{de}{dt}.$$

Ähnlich läßt sich (IB), die Gleichung für die Elektrizitätsmengen umformen:

Division von (IB) durch $(dq/dt)\,dt$ gibt:

$$e = R\,\frac{dq}{dt} + L\,\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{q}{C}.$$

Hieraus folgt:

$$\text{(IIB)} \qquad \frac{d^2q}{dt^2} + \frac{R}{L}\,\frac{dq}{dt} + \frac{q}{L.C} = \frac{e}{L}.$$

Um die Interpretation dieser Differentialgleichungen einfacher gestalten zu können, möge nun eine Spezialisierung getroffen werden, die einzig bei unserem Problem der Kondensatorentladungen in Betracht kommt.

Zuerst werden hier nämlich die beiden Belegungen des Kondensators — durch die Bolometer hindurch — mit den Polen einer Hochspannungsbatterie verbunden.

In diesem Falle ist die treibende elektromotorische Kraft gleich der Potentialdifferenz der Akkumulatoren und darf also als *konstant* angesehen werden.

Dann wird der Akkumulator ganz abgeschaltet; für die Entladung des Kondensators kommt folglich eine äußere elektromotorische Kraft *überhaupt nicht in Frage.*

Es ist demnach in den Gleichungen (IIA) und (IIB) zu setzen:

Bei Betrachtung der Vorgänge bei der Ladung die elektromotorische Kraft:

$$e = \text{konst.}, \quad \frac{de}{dt} = 0.$$

Für die Entladung dagegen:

$$e = 0; \quad \frac{de}{dt} = 0.$$

Zunächst werde das Problem für die *Entladung* des Kondensators behandelt.

Die Lösung der Differentialgleichung:

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{R}{L}\frac{di}{dt} + \frac{i}{LC} = 0 \tag{III A}$$

ist

$$i = c_1 e^{-\frac{t}{T_1}} + c_2 e^{-\frac{t}{T_2}}. \tag{IV A}$$

Wo

$$T_1 = \frac{2LC}{RC - \sqrt{R^2C^2 - 4LC}} \qquad T_2 = \frac{2LC}{RC + \sqrt{R^2C^2 - 4LC}}.$$

Es ist bekannt, daß in dem Entladungskreise elektrische Schwingungen entstehen, wenn $R^2 C^2 \angle 4L$ ist.

Weil nun dieser imaginäre Wert der Wurzel auf ganz andere Gleichungen führt, möge nur der in unserer Experimentaluntersuchung tatsächlich vorliegende Fall betrachtet werden.

Leider konnte die Selbstinduktion des Gesamtentladungskreises nicht experimentell bestimmt werden. Dazu kommt, daß bei variabelem Rheostatenwiderstand auch dessen Selbstinduktion variierte. Doch genügt es wohl für die vorliegende Betrachtung, wenn die *Größenordnung* der Selbstinduktion bekannt ist.

Die Selbstinduktion der Litzenleitung von 4 mm² Querschnitt und 6,6 m Länge berechnet sich, wenn man die Durchmesser der Drähte einander und dem Abstand der Drahtachsen gleichsetzt, zu:

$$L_L = 3{,}77 \,.\, 660 \text{ cm}$$
$$= \text{ca. } 2{,}5 \,.\, 10^3 \text{ cm}.$$

Die Selbstinduktion der beiden kleinen Glühlampen darf vernachlässigt werden.

Ein Versuch zeigte, daß die Selbstinduktion der Bolometer und der Nikelinspulen unter 10^4 cm war. Nimmt man daher für den ganzen Stromkreis + Rheostat den Wert 10^5 cm, so dürfte derselbe eher zu hoch als zu niedrig gegriffen scheinen.

Der kleinste Wert der Kapazität c, mit dem gearbeitet wurde, war $^1/_{10}$ Mikrof. also $c = 1 \,.\, 10^{-16}$ C.G.S.-Einh.

Der kleinste Wert des Widerstandes betrug 1100 Ω, also

$$R = 1{,}1 \,.\, 10^3\, \Omega = 1{,}1 \,.\, 10^{12} \text{ C.G.S.-Einh.}$$

$$R^2 = 1{,}2 \,.\, 10^{24} \text{ C.G.S.-Einh.}$$

$$R^2 C \text{ sind also } = 1{,}2 \,.\, 10^8 \text{ C.G.S.-Einh.}$$

Die Selbstinduktion dürfte folglich 1000 mal größer sein, bis Schwingungen entstehen würden.

Legt man zur numerischen Berechnung von T_1 und T_2 die mittleren Werte

$$C = 4 \,.\, 10^{-16} \text{ (C.G.S.)}$$

$$R = 1{,}1 \,.\, 10^{12} \text{ (C.G.S.)}$$

$$L = 1 \,.\, 10^5 \text{ (C.G.S.)}$$

zugrunde, so erhält man:

$$2LC = 2 \,.\, 10^5 \,.\, 4 \,.\, 10^{-16} = 8 \,.\, 10^{-11}$$

$$RC = 1{,}1 \,.\, 10^{12} \,.\, 4 \,.\, 10^{-16} = 4{,}4 \,.\, 10^{-4}$$

$$R^2 C^2 = 19{,}36 \,.\, 10^{-8}$$

$$4LC = 1{,}6 \,.\, 10^{-10}$$

$$T_1 = \frac{8 \,.\, 10^{-11}}{4{,}4 \,.\, 10^{-4} - 4{,}3982 \,.\, 10^{-4}} = \frac{8 \,.\, 10^{-11}}{1{,}8 \,.\, 10^{-7}} = 4{,}44_4 \,.\, 10^{-4}$$

$$T_2 = \frac{8 \,.\, 10^{-11}}{4{.}4 \,.\, 10^{-4} + 4{,}3982 \,.\, 10^{-4}} = 8{,}79 \,.\, 10^{-7}.$$

Zurückgreifend auf Gleichung

(IIIA) $$\frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{R}{L}\frac{di}{dt} + \frac{i}{LC} = 0$$

finden wir:

(IVA) $$i = c_1 e^{-\frac{t}{T_1}} + c_2 e^{-\frac{t}{T_2}}.$$

Analog folgt aus (III B):

$$\text{(III B)} \qquad \frac{d^2q}{dt^2} + \frac{R}{L}\frac{dq}{dt} + \frac{q}{LC} = 0,$$

$$\text{(IV B)} \qquad q = c' e^{-\frac{t}{T_1}} + c'' e^{-\frac{t}{T_2}}.$$

Die Konstanten c_1, c_2, c' und c'' werden bestimmt durch die Anfangsbedingungen:

Zur Zeit $t = 0$ ist $i = 0$ und $q = Q$

„ „ $t = \infty$ „ $i = 0$ „ $q = 0$.

Hieraus folgt:

$$0 = c_1 + c_2 \qquad c_1 = -c_2,$$

woraus

$$Q = c' + c''.$$

Durch Differenzieren von (IV B) folgt:

$$\frac{dq}{dt} = i = -\frac{c'}{T_1} e^{-\frac{t}{T_1}} - \frac{c''}{T_2} e^{-\frac{t}{T_2}},$$

diese Gleichung gibt mit (IV A)

$$c' = -c_1 T_1$$

$$c'' = -c_2 T_2 = c_1 T_2.$$

Ferner ist

$$c' + c'' = Q = c_1 (T_2 - T_1).$$

Also kommt:

$$c_1 = \frac{Q}{T_2 - T_1} \qquad c' = \frac{Q T_1}{T_1 - T_2}$$

$$c_2 = \frac{Q}{T_1 - T_2} \qquad c'' = \frac{Q T_2}{T_2 - T_1}.$$

Hieraus ergibt sich:

$$\text{(V A)} \qquad i = \frac{Q}{T_2 - T_1}\left\{e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}}\right\}$$

$$\text{(V B)} \qquad q = \frac{Q}{T_1 - T_2}\left\{T_1 e^{-\frac{t}{T_1}} - T_2 e^{-\frac{t}{T_2}}\right\}$$

oder aus (V A)

$$\text{(VI)} \qquad i = \frac{Q}{\sqrt{R^2 C^2 - 4LC}}\left\{e^{-\frac{t}{T_2}} - e^{-\frac{t}{T_1}}\right\}.$$

Die Ladung Q des Kondensators berechnet sich bei 106 Volt und 0,4 Mikrof. zu $4{,}24 \cdot 10^{-6}$ C.G.S. (zu je 10 Coulomb). Aus diesem Werte sowie aus den Konstanten

$$T_1 = 4{,}44 \cdot 10^{-4} \quad \text{und} \quad T_2 = 8{,}79 \cdot 10^{-7}$$

ergibt sich:

$$i = \frac{4{,}24 \cdot 10^{-6}}{4{,}44 \cdot 10^{-4}} \cdot \left\{ e^{-\frac{t \cdot 10^7}{9.1}} - e^{-\frac{t \cdot 10^4}{8}} \right\}$$

$$= 0{,}009641 \cdot \left\{ e^{-\frac{t \cdot 10^4}{8.77}} - e^{-\frac{t \cdot 10^4}{4.444}} \right\}.$$

Um i als Funktion von t in Kurvenform darzustellen, empfiehlt es sich, die beiden logarithmischen Linien aufzuzeichnen; die Differenz ihrer Ordinaten bildet jeweils die Ordinate von i. Hierbei erkennt man, daß die Kurve, die das erste Glied charakterisiert, bei einem handlichen Maßstab für die zweite Kurve fast in den Koordinatenachsen verläuft. Infolge der kleinen Selbstinduktion L des Kreises wird das erste Glied so klein, daß es gegen das zweite vernachlässigt werden kann. Die Zeit, die vergeht, bis der Strom seinen Maximalwert erreicht hat, ist also sehr klein gegen die Dauer seines Verlaufes. In Wirklichkeit wird sie durch den nicht momentanen Schluß etwas vergrößert.

Berechnet man die Zeit, zu welcher der Strom seinen Maximalwert besitzt, durch Differenzieren von (VI), so kommt

$$t_{(i = \max.)} = \frac{L\,C}{\sqrt{R^2\,C^2 - 4\,L\,C}} \lg n \frac{T_1}{T_2}$$

$$= \frac{4 \cdot 10^{-11}}{4{,}4 \cdot 10^{-4}} \cdot \lg n \frac{8 \cdot 10^{-4}}{9{,}1 \cdot 10^{-7}}$$

$$= 6{,}16 \cdot 10^{-7} \text{ Sek.}$$

Die Zeichnung der Kurve

$$i = -\frac{0{,}00964}{e^{\frac{t \cdot 10^4}{4{,}44}}}$$

wird nach bekannten Methoden durchgeführt und liefert Taf. II, Fig. 2.

Da alle Werte in C.G.S.-Einh. gemessen wurden, so folgt auch der Wert von i in C.G.S.-Einh. zu 10 Amp. Der Maximalmalwert des Heizstromes ist daher = 0,096 Amp.

Will man annehmen, daß die Selbstinduktion L so klein ist, daß sie gegen die anderen Größen vernachlässigt werden kann und setzt $L = 0$, so werden die Quotienten T_1 und T_2 unbestimmt.

Jedoch erhält man durch Differentiation von

$$T_1 = \frac{2\,L\,C}{R\,C - \sqrt{R^2\,C^2 - 4\,L\,C}}$$

nach L:

$$\frac{\frac{d}{dL}(2\,L\,C)}{\frac{d}{dL}(R\,C - \sqrt{R^2\,C^2 - 4\,L\,C})} = \sqrt{R^2\,C^2 - 4\,L\,C}\,.$$

Setzt man jetzt $L = 0$ so folgt:

$$T_1 = R\,C.$$

Analog:

$$T_2 = -\,R\,C.$$

Es wird daher aus den Gleichungen (IVA) und (IVB)

(VIIA) $$i = c_1\,e^{-\frac{t}{RC}} + c_2\,e^{+\frac{t}{RC}}$$

und

(VIIB) $$q = c'\,e^{-\frac{t}{RC}} + c''\,e^{+\frac{t}{RC}}.$$

Für $t = 0$ ist $q = Q = c'$. Da für $t = \infty$ $i = 0$ und $q = 0$ ist, müssen c_2 und $c'' = 0$ sein. Vereinigt man genau wie oben zur Bestimmung der Konstanten die beiden Gleichungen (VIIA) und (VIIB) mittels der Relation

$$i = \frac{dq}{dt}$$

durch Differentiation von (VIIB), so folgt:

$$i = \frac{dq}{dt} = c_1\,e^{-\frac{t}{RC}} = -\,\frac{c'}{RC}\,e^{-\frac{t}{RC}}.$$

Hieraus:

$$c_1 = -\,\frac{c'}{RC} = -\,\frac{Q}{RC}.$$

Es resultiert also die Gleichung

(VIII) $$i = -\,\frac{Q}{RC}\,e^{-\frac{t}{RC}}$$

durch Einsetzen der Werte:

$$i = -\,\frac{4{,}24\,.\,10^{-5}}{4{,}40\,.\,10^{-4}} \cdot e^{-\frac{t}{4{,}4\,.\,10^{-4}}}$$

$$= -\,\frac{0{,}009636}{e^{\frac{t\,.\,10^4}{4{,}40}}}.$$

Diese Kurve liegt näher an den Achsen wie die erste. Jedoch ist die Differenz so klein, daß auf der Tafel die beiden Kurven noch nicht nebeneinander eingezeichnet werden konnten. Die Differenz zwischen den abfallenden Zweigen der Kurven mit und ohne Selbstinduktion ist gleich der Fläche, welche der ansteigende Zweig der Kurve mit Selbstinduktion mit dem ansteigenden Zweige der Kurve ohne Selbstinduktion, bez. mit der i-Achse bildet. — Diese Rechnung zeigt also, daß es auf die Form der Entladung keinen merklichen Einfluß mehr hat, wenn die Selbstinduktion kleiner sein sollte, als oben angenommen wurde.

Endlich ergibt die Rechnung, daß der Wert des Stromes, bis der Stromkreis wieder geöffnet wird, auf etwa $^1/_{1000}$ des Anfangswertes gesunken ist.

Es bleibt noch die Frage zu beantworten, ob sich nicht dieses „Residuum“ — wenn der Ausdruck in der etwas veränderten Bedeutung gestattet ist — bei jeder neuen Ladung und Entladung vermehrt, so daß sich erst allmählich ein stationärer Zustand herstellt, der einer viel geringeren Kondensatorspannung, einer viel geringeren Kondensatorenergie entspricht.

Nach Gleichung (V B) ist die Ladung q des Kondensators zu der Zeit t:

$$q = V \cdot C \cdot \frac{T_1 e^{-\frac{t}{T_1}} - T_2 e^{-\frac{t}{T_2}}}{T_1 - T_2}.$$

Wo für Q gesetzt würde: $V \cdot C$, und V die Differenz der Anfangs- und der Endspannung bedeutet.

Man erkennt aus dieser Gleichung unmittelbar, daß die in dem Kondensator zurückbleibende Ladung proportional der Ladespannung ist. Wenn daher kleine Residuen in dem Kondensator zurückbleiben, so wird sich die Spannung, bis zu welcher der Kondensator aufgeladen wird, um einen äquivalenten Betrag nach oben verschieben. Die Spannungs*differenz* wird jedoch nicht beeinflußt.

Fast genau dieselben Rechnungen wurden für die *Ladung* des Kondensators durchgeführt. Wie aus Symmetriegründen zu erwarten war, ergaben sich sowohl für das „Residuum“

als für das Diagramm des Ladestromes dieselben Resultate. Daher möge es gestattet sein, hier diese Rechnungen nicht anzuführen.

Im vorhergehenden wurde gezeigt, daß sich mit einer derartigen Kette von aufeinanderfolgenden Ladungs- und Entladungsströmen rechnen läßt wie mit einem gewöhnlichen Wechselstrom. Nun soll ermittelt werden, wie man aus der bekannten Kapazität, der Ladespannung und dem Widerstand von Leitung und Bolometern den Teil der Kondensatorenergie findet, der auf die Bolometer trifft.

Die Energie einer Kondensatorentladung ist

$$E = \tfrac{1}{2} \cdot C \cdot V^2 .$$

Beträgt die Kapazität $c\,(a/10)$ Mikrof., so sind das $a \cdot 10^{-16}$ C.G.S.

Beträgt die Spannung V 107 Volt, wie bei unseren Versuchen, so kommt

$$(107 \cdot 10^8)^2 = 1{,}15 \cdot 10^{20} \text{ C.G.S.},$$

so wird

$$E = \frac{1{,}15}{2}\, a \cdot 10^4 \text{ Erg.}$$

$$1 \text{ Erg sind } = 2{,}39 \cdot 10^{-5} \text{ mg-cal.}$$

$$\frac{1{,}15}{2}\, a^4 \text{ Erg also } 2{,}39 \cdot \frac{1{,}15}{2}\, a \cdot 10^{-2} = 0{,}1375 \text{ mg-cal.}$$

Ebenso groß ist die in Wärme verwandelte Energie bei der Ladung des Kondensators. Nun treffen auf die Sekunde 53,5 Ladungen und 53,5 Entladungen, es fließt also 107 mal in der Sekunde ein Strom durch die Bolometer. Dann berechnet sich die in dem Schließungskreis freigewordene Energie zu $14{,}7 \cdot a$ mg-cal. Energieverluste in dem Dielektrikum können dabei vernachlässigt werden.

Diese $14{,}7 \,.\, a$ mg-cal/sec verteilen sich auf den ganzen Ohmschen Widerstand des Stromkreises, und es ist leicht, die Wärmemenge zu berechnen, die in einem Leiterstück in der Sekunde erzeugt wird. Zu den Bolometern lagen jedoch im Nebenschluß die Nickelinspulen, die ursprünglich geradezu als Drosselspulen gedacht waren, um möglichst viel Strom für die Bolometer übrig zu lassen.

Der Wechselstrom verteilt sich zwischen Bolometern und Spulen nach den Kirchhoffschen Regeln, wenn man nur statt

des Ohmschen Widerstandes R den scheinbaren Widerstand, die Impendanz J des Stromkreises einführt. Die Impendanz ist

$$J = \sqrt{R^2 + (2\,\pi\,n\,L)^2},$$

wo n die Schwingungszahl des (Sinus!-)Wechselstromes und L den Selbstinduktionskoeffizienten des Leiterteiles darstellt.

Nun war nach dem Vorangehenden zu hoffen, daß das zweite Glied unter der Wurzel gegen das erste dürfte vernachlässigt werden, und der Versuch bestätigte diese Annahme.

Es wurde zum Versuche eine Wheatstonesche Brücke gebildet aus einem Meßdraht, 2 (4) Bolometern und 2 (4) Manganinspulen. Mit einem Akkumulator als Stromquelle und einem empfindlichen Galvanoskop in der Brücke wurde die Nullstellung beobachtet. Dann wurde das Galvanoskop gegen ein Telephon vertauscht und statt Gleichstrom der Wechselstrom aus Kondensatorentladungen verwendet.

Das Telephon zeigte ein scharfes Minimum in einer Ausdehnung von 2—3 mm auf dem Schleifdraht, dessen Lage genau mit dem oben beobachteten Nullpunkt zusammenfiel.

Diese Beobachtung, mehrfach wiederholt, schien uns komplizierte Untersuchungen über den Selbstinduktionskoeffizienten überflüssig zu machen. Wir setzen also in diesem Falle den Wechselstromwiderstand

$$J = R.$$

Die kleine Wheatstonesche Brücke setzt dem Heizwechselstrom einen Widerstand von 1,88 Ω entgegen. Eine diesem Widerstand entsprechende Wärmemenge wird in demselben erzeugt. Nur die Hälfte dieser Wärmemenge dient jedoch dazu, die Temperatur der *Bolometer* zu erhöhen. Man kann daher den den Bolometern entsprechenden Widerstand des Entladungskreises als 0,94 [Ω] bezeichnen. Die Kondensatorentladungen liefern in jeder Sekunde $14{,}7 \,.\, a$ mg-cal, die dem Widerstand des Schließungskreises entsprechend frei werden. Hat der Schließungskreis $b \,.\, 1000\ \Omega$, so treffen auf jedes Ohm

$$\frac{a \,.\, 14{,}7}{b \,.\, 1000} = \frac{a}{b} \cdot 0{,}0147 \text{ mg-cal},$$

also auf die 0,94 [Ω] die Bolometer:

$$\frac{a}{b}\ 0{,}0138 \text{ mg-cal/sec.}$$

Die Bolometer waren so geschaltet, daß zwei von den *X*-Strahlen getroffen wurden, die beiden *anderen* dagegen von dem Heizstrom erwärmt werden konnten, so daß die im Galvanometer beobachteten Ablenkungen durch Heizstrom und Bestrahlung entgegengesetzt waren. Wir wollten versuchen, die eine Einwirkung durch die andere zu *kompensieren.*

Diese Idee wurde in allen Hauptversuchen zur Ausführung gebracht und hat sich als eine sehr glückliche erwiesen. Das Galvanometer wurde ständig so empfindlich benutzt, als das irgend möglich war, und seine Voltempfindlichkeit war, wie erwähnt, eine ganz außerordentlich große. Dafür mußte es hingenommen werden, daß der Nullpunkt im Verlauf von einigen Stunden starken Schwankungen unterlag, besonders von der Zimmertemperatur abhängig zu sein schien, daß das System oft nach einigen Tagen umgeschlagen war und neu astasiert werden mußte. Schwingungsdauer und mit ihr die Empfindlichkeit war unmittelbar nach dem Astasieren am größten und ging langsam zurück, sie schien ferner abhängig zu sein von der Größe der Ablenkung.

Von allen Korrektionen wegen dieser Umstände ist die Nullmethode frei. Wenn nur gezeigt ist, daß *X*-Strahlen oder Heizstrom *allein* einen bedeutenden Ausschlag hervorrufen, so ergibt ein Versuch, in dem sich ihre Wirkungen präzis aufheben, unmittelbar die Gleichheit der entsprechenden Energien.

Es wurde einmal der Versuch gemacht, die Schwankungen des Galvanometerstromes während eines Kompensationsversuches aufzuzeichnen (Taf. II, Fig. 3). Der Primärstrom betrug 3,7 Amp., die Röhre wurde also beträchtlich angestrengt. Es wurde berechnet, daß der Heizstrom *allein* in 30 Sek. eine Galvanometerablenkung von 240 Skt. — in der Figur nach abwärts — hervorgerufen hätte. Unter dem gleichzeitigen Einfluß von *X*-Strahlen und Heizstrom, die in der Figur beide bei 0 Sek. einsetzen, wandert das Bild der Skala nach den größeren Zahlen zu, das heißt, der Heizstrom hätte etwas stärker genommen werden sollen. Zieht man das aber in Rechnung, indem man die Symmetrielinie *s* einzeichnet, so erkennt man, daß die Abweichungen in den ersten 55 Sek. nur gering sind, daß die Röhre jedoch später, wenn sie warm wird, in diesem Falle weniger Energie ausstrahlt.

Im allgemeinen blieb das Skalenbild des Galvanometers beim Einschalten des Heizstromes ganz ruhig. Sehr selten kam es jedoch vor, daß beim Einschalten ein plötzlicher Ausschlag erfolgte. Da eine elektrostatische Beeinflussung der Heizstromleitung durch den Induktor nahe lag, wurde an der Stelle *E* (Fig. 10) eine Erdleitung angebracht. Später wurde die gesamte Heizstrom- und Prüfstromleitung, der einzige Zweig ohne Metallumkleidung, gleichfalls elektrostatisch geschützt — eine Vorsichtsmaßregel, die auf die Zuverlässigkeit der Messungen keinen merklichen Einfluß mehr hatte. Hier mag erwähnt werden, daß sich manchmal, wenn am Induktor prasselnde Funken überschlugen, ein kräftiger Ausschlag des Galvanometers zeigte, ohne daß sich bei der Seltenheit dieser Erscheinung ihre Ursache feststellen ließ. Doch wurden vorsichtshalber die Messungen ohne parallel geschaltete Funkenstrecke gemacht.

Hand in Hand mit der Energiemessung mit dem Bolometer gingen Versuche über die ladende Wirkung der *X*-Strahlen und deren Abhängigkeit von der bolometrisch gemessenen Energie. Zu diesem Zwecke bedienten wir uns der von Dorn sowie von Curie und Sagnac angegebenen Methode.[1]) Wenn nämlich die *X*-Strahlen in einem Körper (Platinblech), der sich am besten in einem hohen Vakuum befindet, absorbiert werden, so gehen von diesem Körper Kathodenstrahlen aus. Körper, auf welche diese treffen, werden negativ elektrisch geladen, während der Ausgangskörper eine positive Ladung annimmt.

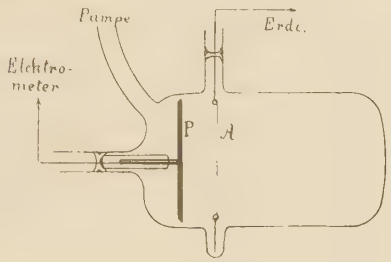


Fig. 12.

Fig. 12 zeigt die Röhre, die uns für die folgenden Versuche zur Verfügung stand. Die *X*-Strahlen durchdringen, von links durch die Glaswand

1) E. Dorn, Abh. d. naturf. Ges. zu Halle **22.** p. 39. 1900; Beibl. **24.** p. 576. 1900; **25.** p. 316. 1901; P. Curie u. G. Sagnac, Compt. rend. **130.** I. p. 1013. 1900; G. Holtzmark, Ann. d. Phys. **10.** p. 522. 1903; vgl. auch K. Hahn, Ann. d. Phys. **18.** p. 140. 1905.

tretend, die auf einem Drahtring gespannte Aluminiumfolie *A* und werden in dem Platinblech *P*, das mit Blei hinterlegt ist, absorbiert. Der Abstand *A* bis *P* betrug 14 mm, der Radius von *P* 20 mm. Man leitet *A* zur Erde ab und mißt mit dem Elektrometer die auf *P* entstehende positive Ladung.

Die Ausführung gestaltete sich folgendermaßen: Die Röhre wurde mit zwei Asbesthaltern in einen Weißblechkasten gesetzt, der durch einen Deckel vollständig geschlossen wurde. In die Stirnfläche des Kastens war ein kreisförmiges Loch geschnitten, das mit Aluminiumfolie bedeckt wurde. Dann wurde der Kasten mit einem winklig gebogenen Flacheisen an der Quecksilberluftpumpe nach Kahlbaum festgeschraubt und die Verbindung von Pumpe und Röhre durch einige Anschmelzstellen hergestellt. Der Abstand der Platinplatte von der Antikathode der *X*-Strahlenröhre betrug 265 mm. Die Fläche der Platinplatte, die 12,6 cm^2 beträgt, wird daher von dem 700sten Teil der Gesamtstrahlung getroffen. Folie und Schutzkasten wurden zur Erde abgeleitet. Das Auspumpen wurde tagelang zeitweise wiederholt und der Kasten dabei auf 130—200° erwärmt.

Um das Elektrometer und seine Zuleitungen vor einer Beeinflussung durch *X*-Strahlen zu schützen, wurde die *X*-Strahlenröhre auf drei Seiten mit einem 4,5 mm starkem Bleischirm umgeben und auch der Blechkasten der Curieschen Röhre überall bis auf die Stirnfläche mit 3 mm starkem Bleiblech belegt. Ein gleicher Bleischirm von 4,5 mm Stärke kam unmittelbar vor das Elektrometer zu stehen. Es hatte sich gezeigt, daß er an dieser Stelle mehr nützte als dicht hinter dem ersten Schirm. Zur Ablesung des Elektrometers erhielt dieser Schirm eine kleine Öffnung.

Die Quecksilberpumpe mußte durch einen Blechschirm vor den influenzierenden Einflüssen der Induktorleitung geschützt werden.

Von der Röhre führte die Leitung durch ein mit Paraffin ausgegossenes und mit Stanniol belegtes, gebogenes Glasrohr zu einem Quecksilberkontakt und von da durch ein langes Rohr aus Weißblech, das gleichfalls ganz mit Paraffin ausgegossen war, zu dem Wandbrett des Elektrometers. Hier war ein Ausschalter mit Quecksilberkontakt angebracht, welcher

diese ganze Leitungsanlage für gewöhnlich mit der Erde verband, bei Anziehen eines Fadens aber isolierte. Das Weißblechrohr war zum Abheben eingerichtet, damit man bequemer an die Apparate herantreten konnte.

Zur Messung der auf der Platinplatte entstehenden elektrischen Spannung wurde ein Hallwachselektrometer verwendet, das bei einer Nadelschaltung von 400 Volt eine Empfindlichkeit von 128 Skt. pro Volt zeigte. Die Schwingungsdauer der Nadel betrug 5,7 Sekunden.

Als mit den nun folgenden Versuchsreihen begonnen wurde, war das Vakuum in der Röhre von Curie bereits $2^1/_2$ Monate aufrecht erhalten worden. In einem Zeitraum von etwa 8 Tagen verschlechterte sich dasselbe auf etwa $^1/_{1000}$ mm. Die Güte des Vakuums wurde mehr nach dem hellen, metallischen Klang beim Anschlagen des Quecksilbers im Mac Leodschen Manometer beurteilt, als nach der Höhendifferenz der beiden Quecksilbersäulen.

Die folgenden messenden Versuche wurden mit einem neuen Klingelfussinduktor gemacht, der primär 450 Watt vertrug und 40 cm Schlagweite besaß.

Die interessantesten Resultate schienen Versuchsreihen zu versprechen, die eine allmähliche Steigerung der dem Induktor zugeführten Primärenergie zur Grundlage hatten. Denn im Gegensatz zu den früheren Experimentaluntersuchungen war der Galvanometerausschlag, der durch die intensivsten *X*-Strahlen bewirkt wurde, so groß, daß sich noch $^1/_{400}$ desselben wahrnehmen ließ. Eine Gruppe von solchen Versuchsreihen bildete das nächste Ziel der Arbeit.

Da die Anordnung empfindlich gegen Erschütterungen war, schien es sicherer, die Versuche zu einer Zeit zu machen, wo sonst nicht im Institut gearbeitet wurde. Das war abends zwischen 8 und 12 Uhr.

An dieser Stelle sei es mir gestattet, meinem unermüdlichen Mitarbeiter bei allen diesen Versuchen, Hrn. Dr. Joffe, meinen herzlichsten Dank auszusprechen.

Sollte eine Versuchsreihe gemacht werden, so wurde zunächst, $^1/_2$ bis eine Stunde vor Beginn der Versuche, der Prüfstrom geschlossen. Dann wurde der Druck in der Curie-

schen Röhre gemessen und fast jedesmal etwa 10 Min. lang gepumpt. Oft mußte das Galvanometer durch eine geringe Drehung der Richtmagnete auf einen Nullpunkt gebracht werden, der besser in der Mitte der Skala lag. Ferner wurden die Abnehmer des Umschalters geputzt, seine Messingsegmente mit feinem Schmirgelpapier nachgeschliffen und die Batterie für die Kondensatorentladungen angeschaltet. Endlich wurde das Uhrwerk, daß die 15 Sek. schlug, in Gang gesetzt.

Hierauf wurde das Galvanometer langsam eingeschaltet, in der Art, wie das auf p. 27 beschrieben ist.

Endlich wurde der Vorschaltwiderstand des Induktors gewählt und Kapazität und Widerstand des Heizstromkreises meist so reguliert, wie sie nach früheren Versuchen zu erwarten waren. Bei größeren Stromstärken wurden häufig Vorversuche gemacht.

War alles klar zum Versuch, so wurde das Schlagwerk eingeschaltet und das Elektrometersystem isoliert. Alle 15 Sek. wurde mit dem Glockenschlag der Stand des Galvanometers abgelesen, in der Zwischenzeit der Nullpunkt des Elektrometers notiert. Meist nach der zweiten Beobachtung wurde der Turbinenunterbrecher eingeschaltet und mit dem dritten Glockenschlag zugleich der Induktorstrom geschlossen und der Taster für den Heizstrom niedergedrückt. Die Endstellung des Elektrometers wurde nicht mehr abgelesen, da sie doch wenig gegen die vorletzte differierte, die Endstellung des Galvanometers dagegen notiert. Während der Bestrahlung wurden die schwachen Schwankungen der Galvanometerskala beobachtet, mit dem nächsten Glockenschlag — nach 15 Sek. — zugleich Primärstrom und Heizstrom geöffnet, die Schlußstellung des Galvanometers abgelesen und notiert und unmittelbar darauf die Stellung des Elektrometers, das inzwischen zur Ruhe gekommen war, aufgeschrieben. Verluste durch Isolationsfehler waren bei dem Elektrometer so gering, daß sie nicht in Betracht kamen. Meist wurde bei dem nächsten Glockenschlag die Stellung des Galvanometers noch einmal abgelesen, damit man sicher sein konnte, daß keine einseitigen Störungen vorgekommen waren. Ein zweiter Beobachter las während des Betriebes des Indnktors das in den Primärkreis eingeschaltete Ampèremeter ab und gab später die Einstellung

desselben an. Zuletzt wurde die Funkenlänge für diesen Versuch bestimmt.

Das Ampèremeter wurde später mit einem Normalinstrument verglichen. Die Abweichungen, die sich zeigten, waren kleiner als die Fehler bei der Messung des Induktorstromes.

War der Heizstrom zu stark oder zu schwach gewählt gewesen, so daß ein kleiner Ausschlag resultierte, so folgte dem Versuch ein zweiter, der den Fehler beseitigte oder auch ins Gegenteil verkehrte. Aus zwei Versuchen mit kleinen Ausschlägen konnte das Mittel interpoliert werden.

Von Zeit zu Zeit wurde die Spannung des Akkumulators und die Tourenzahl des Unterbrechers gemessen, sowie Kontrollversuche gemacht, ob Bolometer und Elektrometer genügend geschützt seien.

Wenn die Kapazität des Heizstromkondensators zur Kompensation der intensivsten X-Strahlen nicht ausreichte, so wurde die Kondensatorspannung verdoppelt (214 Volt) und dadurch die vierfache Energie verfügbar. Das wird bei den Versuchen 83 und 84 in den Tabellen, wie später durch die Schreibweise: $4 . {}^{3}/_{10}$ ausgedrückt.

Als Beispiel einer Versuchsreihe werde die zweite Hälfte der Reihe I vom Donnerstag, den 8. Dezember 1904 abends angeführt.

Betriebsspannung des Induktors 60 Volt. Röhre I.

Versuch Nr. 80.		Versuch Nr. 81.	
1,95 Ampère	3 cm Schlagweite	2,50 Ampère	5 cm Schlagweite
${}^{3}/_{10}$ Mikrof.	500 Ω Rheostat	${}^{5}/_{10}$ Mikrof.	0 Ω Rheostat
Galvanometer	Elektrometer	Galvanometer	Elektrometer
14,83	28,95	19,70	28,95
14,90	28,95	19,50	28,95
15,00	28,94	19,15	28,90
15,65	Bestrahlung	18,90	Bestrahlung
15,75	23,10	20,50	16,50
15,60	22,95	20,00	16,70
15,55		19,30	

Versuch Nr. 82.

2,50 Ampère 5 cm Schlagweite
$^{6}/_{10}$ Mikrof. 0 Ω Rheostat

Galvanometer		Elektrometer
19,75		28,97
19,92		28,93
19,85	Be-	28,90
19,30	strahlung	
19,90		16,80
19,90		16,50
19,78		16,60

Versuch Nr. 83.
214 Volt.

2,8 Ampère 7 cm Schlagweite
$^{3}/_{10}$ Mikrof. 100 Ω Rheostat

Galvanometer		Elektrometer
24,48		28,80
24,38		28,75
24,35	Be-	28,70
24,90	strahlung	
25,10		12,40
25,60		12,20
25,35		12,40

Versuch Nr. 84.
214 Volt.

2,8 Ampère 7 cm Schlagweite
$^{3}/_{10}$ Mikrof. 50 Ω Rheostat

Galvanometer		Elektrometer
32,50		28,82
32,50		28,79
32,50	Be-	
28,90	strahlung	13,50
30,05		13,20
30,25		13,35

Bei den folgenden Tabellen wird in der ersten Spalte die Nummer des Versuches angegeben. Dann folgt die Angabe der Stärke des Primärstromes sowie der maximalen Funkenstrecke, welche, parallel zu der Röhre geschaltet, zwischen Zinkkugeln durchschlagen wurde. In der vierten und fünften Spalte sind die verwendete Kapazität in Mikrofarad und der Gesamtwiderstand des Heizstromkreises angegeben. Hierauf kommt die in 15 Sekunden Bestrahlung entstandene Ablenkung des Galvanometers, die, wenn die Kompensation vollständig gelungen, $= 0$ ist, endlich die aus den drei letzten Daten berechnete Energie der X-Strahlen. In der letzten Spalte steht die beobachtete Ablenkung des an die Curiesche Röhre geschalteten Elektrometers.

Versuchsreihe I. Donnerstag, 8. Dezember 1904. Betriebsspannung des Induktors 60 Volt. Röhre I von Siemens & Halske. Mittelhart.

Nr.	Ampère	Schlagw. cm	Kapazität in Mikrof.	Gesamtwiderstand	Ausschlag des Galvanometers	Energie mg-cal/sec	Elektrometer	
75	1,1	1,2	$^1/_{10}$	3800	— 1,5	0,0036	5,5	5,75
76	1,1	1,2	$^1/_{10}$	3400	+ 0,0	0,0041	6,0	
77	1,5	1,7	$^1/_{10}$	1900	+ 4,0	0,0107	28,5	27,7
78	1,5	1,7	$^1/_{10}$	1700	0,0	0,00813	26,9	
79	1,95	3,0	$^3/_{10}$	1200	— 3,8	0,0311	51,5	55,0
80	1,95	3,0	$^3/_{10}$	1600	+ 6,0		58,4	
81	2,5	5,0	$^5/_{10}$	1100	+19,0	0,0661	122,0	121,5
82	2,5	5,0	$^6/_{10}$	1100	— 7,0		121,0	
83	2,8	7,0	4 . $^3/_{10}$	1200	+ 6,0	0,1389	163,0	158,0
84	2,8	7,0	4 . $^3/_{10}$	1150	−36,0		152,9	

Versuchsreihe II. Freitag, 9. Dezember 1904. Betriebsspannung des Induktors 60 Volt. Röhre II von Siemens & Halske. Hart.

Nr.	Ampère	Schlagw. cm	Kapazität in Mikrof.	Gesamtwiderstand	Ausschlag des Galvanometers	Energie mg-cal/sec	Elektrometer	
85	1,1	1,6	—	—	+ 1,2	0,00	2,4	2,5
86	1,1	1,6	$^1/_{10}$	10100	— 2,0		2,6	
88	1,45	3,2	$^1/_{10}$	4100	0,0	0,0034	12,7	12,7
89	1,9	6,8	$^1/_{10}$	1100	— 6,0	0,0122	36,5	37,55
90	1,9	6,8	$^1/_{10}$	1200	+ 5,3		38,6	
91	2,5	10,0	$^5/_{10}$	1200	−17,5	0,0506	83,8	89,0
92	2,5	10,0	$^5/_{10}$	1300	— 6,0		88,2	
93	2,5	10,0	$^5/_{10}$	1700	+25,0		95,1	
94	2,8	11,0	$^7/_{10}$	1100	— 5,5	0,0865	116,3	117,9
95	2,8	11,0	$^7/_{10}$	1150	+13,0		119,5	

Diese Versuchsreihe zeigt, daß die harte Röhre fast dieselbe Energie ausstrahlt wie die weiche.

Versuchsreihe III. Samstag, 10. Dezember 1904. Betriebsspannung des Induktors 110 Volt. Röhre II von Siemens & Halske.

Nr.	Ampère	Schlagw. cm	Kapazität in Mikrof.	Gesamtwiderstand	Ausschlag des Galvanometers	Energie mg-cal/sec	Elektrometer	
96	2,0	—	$^1/_{10}$	1200	0,0	0,0115	35,0	35,0
97	3,0	10,0	$^3/_{10}$	1300	−14,5	0,0783	110,8	111,8
98	3,0	10,0	$^7/_{10}$	1300	+ 8,0		112,8	
99	3,4	11,0	$^{10}/_{10}$	1100	— 3,0	0,1255	135,5	135,5
100	3,7	9,0	4 . $^3/_{10}$	1100	−46,5	0,1482	151,2	155,0
101	3,7	9,0	4 . $^3/_{10}$	1150	+47,5		159,8	

Versuchsreihe IV. Montag, 12. Dezember 1904. Betriebsspannung des Induktors 110 Volt. Röhre II.

Nr.	Ampère	Schlagweite cm	Kapazität in Mikrof.	Gesamtwiderstand	Ausschlag des Galvanometers	Energie mg-cal/sec	Elektrometer	
102	2,3	6,5	$^{3}/_{10}$	1200	− 8,5	0,0345	69,1	66,9
103	2,3	6,5	$^{3}/_{10}$	1600	0,0	0,0259	64,8	
104	2,6	8,0	$^{4}/_{10}$	1150	+ 7,0	0,0488	94,4	91,7
105	2,6	8,0	$^{4}/_{10}$	1100	−13,5		89,0	
106	3,15	9,0	$^{9}/_{10}$	1200	− 6,6	$0,0998_5$	126,9	129,2
107	3,15	9,0	$^{9}/_{10}$	1170	−11,0		131,5	
108	3,85	10,4	4 . $^{4}/_{10}$	1100	−19,0	0, 200	161,9	167,2
109	3,85	10,4	4 . $^{4}/_{10}$	1110	+26,0		172,5	
110	3,90	(10,4)	4 . $^{4}/_{10}$	1110	+18,0	0,2690	178,2	174,6
111	3,95	10,0	4 . $^{5}/_{10}$	1150	+ 7,0		171,0	
112	4,05	10,0	4 . $^{5}/_{10}$	1100	+21,5		196,0	196,0

Versuchsreihe V. Montag, 12. Dezember 1904. Betriebsspannung des Induktors 110 Volt. Röhre I.

Nr.	Ampère	Schlagweite cm	Kapazität in Mikrof.	Gesamtwiderstand	Ausschlag des Galvanometers	Energie mg-cal/sec	Elektrometer	
114	2,0	4,0	$^{1}/_{10}$	1300	− 6,0	0,0095	26,6	26,3
115	2,0	4,0	$^{1}/_{10}$	1400	0,0	0,0099	26,0	
116	2,45	8,0	$^{2}/_{10}$	1100	− 5,0	0,0242	68,9	69,5
117	2,45	8,0	$^{2}/_{10}$	1300	+16,0		70,0	
119	2,95	9,0	$^{6}/_{10}$	1200	+16,0	0,0706	127,0	127,0
120	3,5	9,5	4 . $^{3}/_{10}$	1100	−13,5	0,1496	189,0	190,5
121	3,5	9,5	4 . $^{3}/_{10}$	1120	+22,5		192,0	
122	3,85	10,5	4 . $^{6}/_{10}$	1200	+24,0	0,2810	222,0	230,1
123	3,85	10,5	4 . $^{6}/_{10}$	1150	−42,0		238,3	
125	3,0	9,0	$^{7}/_{10}$	1100	+10,0	0,0975	134,0	136,0
126	3,0	9,0	$^{8}/_{10}$	1100	− 3,0		138,0	

Auf Taf. II, Figg. 4 und 5 wurde die Abhängigkeit der X-Strahlenenergie von der an dem eingeschalteten Ampèremeter abgelesenen Stromstärke graphisch dargestellt. Es zeigen diese Kurven, daß die emittierte Energie erst sehr langsam, bei höheren Stromstärken aber ungemein schnell wächst, ferner, daß die weiche Röhre bei derselben Stromstärke eine nur wenig größere Energie auszusenden scheint. Die Kurve III der Fig. 4 hat in ihrem oberen Teil einen Wendepunkt, eine Erscheinung, die sich zwanglos aus dem Auftreten starker Büschelentladungen an den Zuführungsdrähten erklären läßt, das bei dieser Versuchsreihe beobachtet wurde.

Die Versuche 18, 19 und 21 hatten ergeben (vgl. p. 29), daß die doppelte Anzahl der Unterbrechungen etwa die fünffache Galvanometerablenkung hervorbrachte. Dabei stieg die Primärstromstärke auf das Doppelte. Will man nur diesen Umstand in Betracht ziehen, so läßt sich das Resultat durch die neuen Kurven erklären: Es lassen sich da leicht zwei Entfernungen auf der horizontalen Achse angeben, deren Länge sich wie 1 : 2 verhält, während die zugehörigen Ordinaten im Verhältnis 1 : 5 stehen.

Die vorliegenden Resultate sind ferner nicht reduziert:

1. auf die Absorption der Strahlung in der Glaswand der Röhre.

2. auf die Absorption in den Schutzhüllen der Bolometer,

3. auf die *unvollständige* Absorption in den Bolometern.

Die zweite Korrektion dürfte gegen die erste zu vernachlässigen sein, die leider nicht bestimmt werden konnte. Der Absorptionskoeffizient der Bolometer wurde dagegen am Ende der Arbeit (vgl. p. 79) für zwei Fälle bestimmt. Nach den dort gewonnenen Resultaten darf man für die Strahlen der Röhre I eine Absorption von 95 Proz., für die Röhre II eine Absorption von 85 Proz. annehmen.

Berechnung der Gesamtstrahlung.

Die Fläche der Bolometer betrug 84,4 cm² und war 22 cm von der Antikathode entfernt. Man darf annehmen, daß sich die X-Strahlen kugelförmig von einer Stelle der Antikathode ausbreiten und findet so, daß die Bolometer von $\frac{1}{72{,}2}$ der Gesamtstrahlung getroffen werden.

Wenn nun in einem speziellen Falle die in den Bolometern absorbierte Energie 0,2 mg-cal/sec betrug, so berechnet sich die Gesamtenergie einer Einzelentladung zu

$$\frac{0{,}2 \cdot 72{,}2}{107} = 0{,}135 \text{ mg-cal.}$$

Es wird in dieser Arbeit später gezeigt werden, daß diese Energie in $5 \cdot 10^{-4}$ Sek. verausgabt wird. Daher berechnet sich die Energie einer gedachten, 1 Sek. dauernden Strahlung von dieser Stärke zu

0,27 gr-cal.

Bestimmung des Nutzeffektes der *X*-Strahlenröhre.

Mit der Kenntnis der als *X*-Strahlung aus der Röhre austretenden Energie läßt sich der *Wirkungsgrad* der *X*-Strahlenröhre ermitteln, wenn man durch den Versuch bestimmt, wieviel elektrische Energie in der Röhre in Wärme verwandelt wird.

Um diese Wärmemenge messen zu können, brachten wir die verwendete *X*-Strahlenröhre in ein doppelwandiges Kalorimetergefäß aus Weißblech, dessen Grundriß 500 × 200 mm betrug. Sein Boden war zylindrisch gehalten, um mit einer möglichst geringen Menge Flüssigkeit auszukommen. Ein Deckel wurde nicht aufgesetzt, einmal, damit die Art der Entladungen ständig kontrolliert werden konnte, zweitens weil lebhaft gerührt werden mußte, um den Ausgleich der Temperaturen im Kalorimeter zu beschleunigen.

Als kalorimetrische Flüssigkeit wählten wir Paraffinöl wegen seiner isolierenden Eigenschaften, seiner verhältnismäßig geringen Feuergefährlichkeit und seiner geringen Verdampfung an der Oberfläche.

Die *X*-Strahlenröhre, die horizontal angebracht wurde, so daß ihre Strahlung nach oben gerichtet war, mußte wegen ihres großen Auftriebes mit zwei Hanfschnüren an dem Boden des Gefäßes festgebunden werden. Die Leitungen führten von oben her durch Glasrohre zu ihren Elektroden und waren an denselben leicht angelötet. Das Paraffinöl bedeckte die Kugel etwa 5 mm hoch.

Die Temperatursteigerung wurde mit einem Beckmannthermometer gemessen. Bei den Versuchen wurde konstatiert,

daß dasselbe keine durch elektrostatische Einflüsse bedingte Änderung seiner Einstellung zeigte. Ein schildförmiges, doppelwandiges Gefäß aus Zinkblech, das mit Wasser gefüllt war, beseitigte den Einfluß des Beobachters auf die Temperatur des Kalorimeters.

Der Betrieb der Röhre dauerte stets zwei Minuten. Daß die Röhre im Laufe dieser Zeit ihre Härte und die emittierte Energie ändere, dürfte wahrscheinlich sein.

Die Versuche zeigen, daß die in der Röhre freiwerdende Wärmemenge sich erst in etwa $^1/_2$ Stunde auf das ganze Kalorimeter verteilt hat, obwohl fast ununterbrochen gerührt wurde.

Als einwandfrei möchten wir folgende Versuche anführen:

Versuch Nr.	Ampère, primär	Härte der Röhre	X-Strahlenenergie aus Taf. II, Fig. 5	Gesamtenergie der X-Strahlen pro Sekunde	Temperatursteigerung im Kalorimeter
				mg-cal/sec	
5	3,0	hart	0,07 + 15 % = 0,080	5,76	0,254°
6	2,8	etwas härter	0,06 + 20 % = 0,072	5,19	0,257
7	2,1	weich	0,02 + 5 % = 0,021	1,51	0,190
8	2,8	mittelhart	0,08 + 10 % = 0,088	6,35	0,403
9	3,7	hart	0,17 + 15 % = 0,195	14,06	0,575
10	2,6	mittelhart	0,05 + 10 % = 0,054	3,88	0,180
11	1,9	„	0,005	0,36	0,115

Um auf einfache Weise die dieser Erwärmung äquivalente Energie zu ermitteln, wurde eine ähnliche Temperatursteigerung durch einen Heizstrom hervorgebracht.

Es wurde zu diesem Zwecke die Röhre mit einem etwa 3 m langen, dünnen Manganindraht umwunden, derart, daß die Windungen am dichtesten an den Stellen lagen, die beim Betrieb am heißesten wurden. Die Stromzuführung erfolgte durch dieselben Elektroden wie bisher, — wie überhaupt das ganze Kalorimeter unverändert belassen wurde.

Die Stärke des Heizstromes sowie sein Spannungsverlust zwischen den Enden des Manganindrahtes wurde mit Präzisionsinstrumenten gemessen und daraus die im Kalorimeter in Wärme verwandelte Energie bestimmt.

Es wurden bei verschiedenen Stromstärken Versuche gemacht, die sich in folgender Weise zusammenstellen lassen:

Mittlere Spannung	Ampère, Heizstrom	Grad Temperatursteigerung in 2 Minuten	Energie pro Grad Temperatursteigerung
32,5 Volt	1,17	0,170	6,46 Cal
38,5	1,38	0,240	6,42
51,5	1,75	0,406	6,40
59,0	1,95	0,527	6,24
64,0	2,11	0,635	6,13

Die scheinbare Abnahme des Wasserwertes beruht wohl auf einer vermehrten Ausstrahlung der zum Teil stark erwärmten Ölschichten. Dieser Fehler ist gegen den bei der Schätzung der *X*-Strahlenenergie gemachten zu vernachlässigen.

Bemerkenswert ist, daß bei *diesen* Versuchen schon fünf Minuten nach dem Heizen Temperaturkonstanz eintrat.

Hält man das Resultat dieser Versuche mit Heizstrom mit den bei den *X*-Strahlenversuchen gefundenen Temperaturerhöhungen zusammen, so ergibt sich unmittelbar die folgende Tabelle:

Versuch Nr.	Temperatursteigerung im Kalorimeter	Verbrauchte Energie	In *X*-Strahlen verwandelte Energie	Nutzeffekt
		mg-cal/sec	mg-cal/sec	Promille
5	0,254°	13 380	5,76	0,43
6	0,257	13 530	5,19	0,38
7	0,190	10 010	1,51	0,15
8	0,403	21 240	6,35	0,30
9	0,575	30 280	14,06	0,47
10	0,180	9 485	3,88	0,41
11	0,115	6 059	0,36	0,06

Diese Resultate lassen erkennen: 1. daß der Nutzeffekt der *X*-Strahlenröhre sehr klein ist, 2. daß sich der Wirkungsgrad bei höherer Stromstärke verbessert.

Dritter Teil.

Gleichzeitig mit den Beobachtungen am Galvanometer wurde die Elektrizitätsmenge, welche von den Kathodenstrahlen in der Röhre nach Dorn-Curie erzeugt war, elektrometrisch gemessen. Diese Ablesungen des Elektrometers, die in der letzten Spalte der vorangehenden Tabellen aufgeführt sind, wurden in den Figg. 6 und 7 der Taf. II als Funktion der Primärstromstärke aufgeführt. Diese Kurven haben Ähnlichkeit mit den entsprechenden Figg. 4 und 5.

Auf der Fig. 8 der Taf. II sind nun die mg-cal als Abszissen, die dabei beobachteten Elektrometerablenkungen als Ordinaten gewählt. Sie gibt also den wichtigen und interessanten Zusammenhang zwischen der bolometrisch und der elektrometrisch gemessenen Energie der *X*-Strahlen.

Es scheint, als ob die beiden entwickelten Energieformen einander nicht proportional sind. Der ganze folgende Hauptteil dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Untersuchung dieser Frage und erbringt endlich den Nachweis der Proportionalität.

Eine Erscheinung, die mit der beschriebenen enge zusammenhängt, läßt sich beobachten, ohne daß der Gebrauch der Bolometer nötig wäre.

Es werde die Röhre von Curie *mehrere Minuten* den *X*-Strahlen ausgesetzt. Durch die Absorption der Strahlung wird dann eine immer wachsende Elektrizitätsmenge erzeugt, deren Spannung in kurzen Intervallen, je 15 Sek., während der Bestrahlung abgelesen wird. Es zeigt sich nun, daß die in 15 Sek. erzeugten Spannungsbeträge im *Anfang* der Bestrahlung erheblich *größer* sind, als die gegen das Ende des Versuches hinzukommenden (Taf. II, Fig. 9). Leitet man da-

gegen die entstehende Elektrizität kontinuierlich zur Erde ab, und isoliert das Elektrometersystem erst, wenn die *X*-Strahlenröhre einige Minuten in Tätigkeit war, so resultiert in 15 Sek. wieder dieselbe größere Spannung, als ob die Bestrahlung eben erst begonnen hätte.

Es wurde nachgewiesen, daß die Ablenkung des Elektrometers der angelegten Spannung proportional war (Eichungskurve: Taf. II, Fig. 10); die Änderungen seiner Kapazität dürften vernachlässigt werden. Daher schien es, als ob die hinzukommende Elektrizitätsmenge von der *vorhandenen* Spannung abhängig wäre.

Um das zu untersuchen, luden wir das Elektrometersystem mit einem *Akkumulator* auf 2 Volt und in der Tat wurde der Zuwachs bei einer 15 Sekundenbestrahlung viel kleiner, ja, überschritt die Anfangsladung einen Maximalwert, so wurde dieser Zuwachs sogar negativ. Diese Erscheinung läßt sich durch die Annahme erklären, daß die geringen Luftreste, die trotz allen Pumpens in der Curieschen Röhre zurückgeblieben sind, durch die Strahlung ionisiert werden und daß gleichzeitig mit dem Entstehen einer gewissen Elektrizitätsmenge, bez. mit dem Auftreten einer Spannung, ein elektrischer Strom in dem ionisierten Gase entstehe.

Bei der analytischen Behandlung dieses Problems trat die Frage auf, ob der Intensität der *X*-Strahlen die Elektrizitäts*menge* oder die elektrische (Kondensator-) *Energie* proportional sei.

Macht man zunächst die zweite Annahme, so läßt sich die Beziehung aufstellen:

Die beobachtete Energiezunahme = dem totalen Energiezuwachs vermindert um die Fortführung von Energie durch Ionisation, oder:

$$(1) \qquad \tfrac{1}{2} K\, d(V^2) = E\, dt - C \cdot V^2\, dt,$$

wenn man mit K die Kapazität des Systems, mit E die Energie und mit c eine Konstante der Ionisation bezeichnet.

Hieraus erhält man die Beziehung:

$$(2) \qquad \frac{K}{2c} \lg n. \frac{E}{E - C V^2} = t.$$

Aus Gleichung (1) berechnet sich die erreichbare Maximalspannung

$$\frac{d\,V^2}{dt} = 0$$

zu:

(3) $$V^2_{\text{max.}} = \frac{E}{C}.$$

Diese Gleichungen sollten durch Versuche geprüft werden. Es wurde zu diesem Zwecke wieder wie früher die durch Bestrahlung entstehende Spannung alle 15 Sek. abgelesen. Nach 5—6 Beobachtungen wurde der Induktor ausgeschaltet, das Elektrometer mit einem Akkumulator aufgeladen und durch eine neue, ganz kurze Bestrahlung ausprobiert, ob die Ladung den erreichbaren Maximalwert hatte. Die Versuche scheiterten jedoch daran, daß die Röhre bei größeren Stromstärken nicht genügend lange Zeit gleichmäßig arbeitete: das nachträglich bestimmte Maximum war oft niedriger, als der letzte Punkt der Kurve.

Deshalb wurden die Versuche in folgender Weise abgeändert:

Das Elektrometersystem wurde mit zwei Akkumulatoren nach und nach von 0 Volt bis über das Maximum hinaus aufgeladen. Nach jeder Vergrößerung der Spannung wurde eine Bestrahlung von immer gleicher Zeitdauer vorgenommen. Durch diese Bestrahlung wird das Potential des Elektrometersystems um einen bestimmten Betrag vermehrt, dessen Größe von der Anfangsspannung abhängig ist. Trägt man nun auf einem Koordinatenkreuz die Anfangsspannungen als Abszissen, die Zuwachse als Ordinaten auf, so erhält man die Kurven 1—4 Taf. II, Fig. 11. Es zeigt sich, daß diese Kurven Gerade sind und daß sie diesen Charakter auch dann nicht verlieren, wenn man eine Korrektion der Anfangsspannung wegen der durch die Bestrahlung hinzukommenden Spannung unternimmt. Durch diese Geraden ist direkt bewiesen, daß es nicht die elektrische *Energie* sein kann, die hier in Frage kommt.

Nimmt man nämlich ein Koordinatenkreuz an, dessen eine Achsenrichtung die zunehmende Spannung bezeichnet, die dazu senkrechte Richtung die Zunahme des Quotienten

$$i = \frac{dq}{dt},$$

so ergibt:

1. die Annahme, daß die pro Zeiteinheit zugeführte Elektrizitäts*menge* konstant, daß ferner keine Leitung (durch Ionisation) vorhanden: *eine Parallele zur V-Achse* (Fig. 13);

2. die Annahme, daß eine Leitung nach dem Ohmschen Gesetze vorhanden: *eine Gerade durch den Anfangspunkt*, deren Winkel mit der i-Achse dem Ohmschen Widerstande proportional ist (Fig. 14);

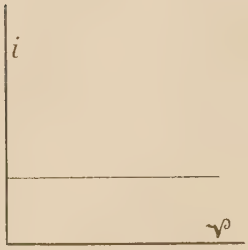


Fig. 13.

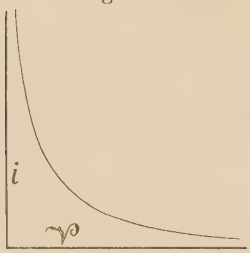


Fig. 15.

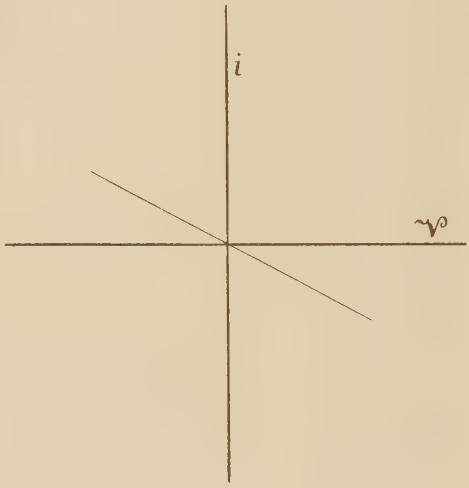


Fig. 14.

3. die Annahme, daß $V \cdot i =$ konst., daß also die elektrische *Energie* pro Zeiteinheit konstant, und daß keine Leitung vorhanden: ein Hyperbel (Fig. 15).

Die geraden Linien, welche die Versuche ergaben, sind nun aber deutlich eine Superposition von 1 und 2. Sicher fehlt ihnen — wie auch den reduzierten Geraden — die Tendenz, bei Annäherung an die Spannung o nach ∞ zu wachsen.

Daraus folgt, daß nicht die *Energie* pro Zeiteinheit konstant ist, sondern die *Elektrizitätsmenge* pro Zeiteinheit.

Einige weitere Versuche zeigen die Änderung der Lage der Geraden mit dem Gasdruck in der Röhre (Kurve 2 und 3) und mit der Primärstromstärke (Kurve 1 und 4).

Die Annahme, daß die pro Zeiteinheit zugeführte Elektrizitäs*menge* konstant ist, führt auf eine ganz ähnliche Differentialgleichung, bei welcher nur V statt V^2 zu setzen ist.

Eine beobachtete Kurve wurde nach dieser Annahme be-

rechnet und ergab Kurve 12, Taf. II. Die beobachteten und die berechneten Werte fallen nahezu zusammen und liefern so eine neue Stütze dieser Annahme.

Das Resultat dieser Untersuchungen ist also, daß sich alle beobachteten Spannungskurven quantitativ ergaben, wenn man annimmt, daß ein Teil der entstehenden Elektrizitätsmenge durch die Ionisation der Luftreste abgeleitet wird.

Um nun die Verluste durch den Ionisationsstrom hintanzuhalten, wurde bei den folgenden Versuchsreihen die durch Bestrahlung entstehende Spannung herabgedrückt. Zu diesem Zweck wurde hinter den Bleischirm, dicht bei dem Elektrometer ein Luftkondensator nach Kohlrausch montiert, der bei einem Durchmesser von 14,6 cm und einem Plattenabstand von 0,12 mm eine Kapazität von 1104 cm besaß. Die Kapazität des Systemes wurde dadurch etwa 6—7 mal so groß.

Mit dieser Versuchsanordnung wurden die beiden Versuchsreihen VI und VII, vom 24. und 25. Januar 1905, gemacht, beide mit der Röhre I.

Versuchsreihe VI.

Nr.	Ampère	Schlagweite cm	Kapazität Mikrof.	Gesamtwiderstand	Ausschlag des Galvanometers	Energie mg-cal/sec	Elektrometer	
127	2,2	5,5	$^1/_{10}$	5100	+ 7,0	0,0085	4,6	4,45
128	2,2	5,5	$^1/_{10}$	1100	− 4,5		4,3	
129	2,75	9,0	$^2/_{10}$	1100	− 9,3	0,0181	9,6	9,57
130	2,75	9,0	$^2/_{10}$	1200	− 6,2	0,0171	9,5	
131	2,75	9,0	$^2/_{10}$	2200	+10,0		9,6	
132	3,7	—	$^8/_{10}$	1100	0,0	0,1005	49,9	49,9

Versuchsreihe VII.

133	3,55	—	$^8/_{10}$	1100	+20,0	0,1175	50,8	50,8
134	3,1	7,5	$^5/_{10}$	1200	− 3,0	0,0550	19,9	19,9
135	3,9	—	4 . $^5/_{10}$	1100	−17,0	0,2368	89,3	89,3
136	4,15	14,0	4 . $^8/_{10}$	1100	−23,0	0,3674	117,2	117,2
137	2,85	—	$^4/_{10}$	1100	− 1,0	0,0421	21,5	21,5
138	3,4	—	$^7/_{10}$	1100	+24,5	0,1050	36,5	38,0
139	3,4	—	$^8/_{10}$	1100	+ 4,6		39,8	

Die Kurven, welche die Abhängigkeit der bolometrisch gemessenen *X*-Strahlenenergie von der Primärstromstärke darstellen, bieten prinzipiell nichts Neues. Erwähnung mag höchstens der Versuch 136 finden, welcher die höchste beobachtete *X*-Strahlenenergie lieferte.

Interessant sind dagegen die Beziehungen zwischen bolometrisch gemessener Energie und der erzeugten Spannung: denn diese Kurven nähern sich bedeutend mehr geraden Linien. Taf. II, Fig. 13.

Es schien wahrscheinlich, daß diese Kurven in Gerade übergehen würden, wenn die Spannung noch mehr vermindert werden könnte. Aber dadurch würde die Empfindlichkeit des Elektrometers so herabgedrückt, daß man die schwächeren Strahlen nicht mehr genügend sicher messen könnte.

Es boten sich nun zwei Wege dar, die Messungen bei genügend kleiner Spannung mit genügender Genauigkeit durchzuführen. Der erste war, die isolierte Platte in der Curieschen Röhre durch ein Galvanometer hindurch zur Erde abzuleiten. Der entstehende Strom wurde zu etwa $4 . 10^{-11}$ Amp. berechnet. Da aber die Aufstellung eines zweiten Panzergalvanometers zu umständlich schien, wurde dieser Weg verworfen und der zweite gewählt.

Es war dies *die Kompensation der entstehenden Elektrizitätsmenge mit dem piezoelektrischen Quarz von Curie.*[1])

Den Hauptbestandteil dieses interessanten Apparates bildet bekanntlich eine Lamelle aus Quarz, deren Breitendimension die Richtung der optischen Achse ist, während ihre beiden Flächen normal zu der Richtung einer elektrischen Achse sind. An ihren beiden Enden sind Messingfassungen angebracht und die Flächen der Lamelle mit leitenden Belegungen versehen. Mit der oberen Fassung kann man den Quarz in das Instrument einhängen, an der unteren eine Wagschale befestigen. Setzt man ein Gewicht auf die Schale, so werden auf jeder Belegung entgegengesetzt gleiche Elektrizitätsmengen frei.

Es gilt die Beziehung:

$$q = c \cdot \frac{L}{d} \cdot P,$$

1) J. Curie, Lum. électr. **29.** p. 62—69. 1888; Fortschritte **44.** II. p. 431.

wo q die Elektrizitätsmenge in C.G.S.-Einh., c eine Konstante $= 0{,}063$, L die Länge der Belegungen und d die Dicke der Lamelle, beides in Millimetern, P der angewandte Zug in Kilogramm.

Die Elektrizitätsmenge ist demnach unabhängig von der *Breite* der Lamelle.

In unserem Fall war $L = 54$ mm, $d = 0{,}63$ mm. Die Breite betrug 20 mm.

Der Innenraum des Instrumentes wird zur Sicherung der Isolation durch Schwefelsäure trocken gehalten. Die eine Belegung der Quarzlamelle wird zur Erde abgeleitet, die andere mit dem isolierten System verbunden.

Der Apparat wurde dicht bei dem Elektrometer, hinter dem zweiten Bleischirm montiert. Ein total reflektierendes Prisma, das auf die Holzfassung des Apparates gestellt werden konnte, lenkte den Gang der Lichtstrahlen von dem Elektrometerspiegel zu dem Platz des zweiten Beobachters. Dicht bei dem Apparat befand sich ein Stativ mit einem Glastrichter, der mit Quecksilber gefüllt war. Ein Glasrohr mit Hahn leitete das Quecksilber nach einem Glasgefäß, das auf der Belastungsschale stand. Dieser Hahn war mit einem langen Hebel versehen, von dessen Ende ein 1,5 m langes Glasrohr bis zu einem parallelen Hebel auf dem Tische des zweiten Beobachters führte. Dadurch konnte von dort aus der Zufluß des Quecksilbers präzis geregelt und die Belastung der Schale so gleichmäßig vermehrt werden, daß die auf den Belegungen des Quarzes entstehende (negative) Piezoelektrizität die in der Dorn-Curieschen Röhre auftretende (positive) Elektrizitätsmenge eben kompensierte. Die Masse des ausgeflossenen Quecksilbers diente direkt als Maß für die entstandenen Elektrizitätsmengen. Es war geprüft worden, daß 1,75 g Belastung einem Skalenteil Ablenkung des Elektrometers entsprach. Mit dieser Beziehung konnte eine kleine Ablenkung am Ende des Versuches reduziert werden.

Mit dieser Anordnung wurden die Versuchsreihen VIII, IX, X, XI, XII (XIII und XIV) gemacht, welche unter den verschiedensten Umständen eine hervorragend gute Proportionalität zwischen der in den Bolometern erzeugten Absorptionswärme und der in der Röhre von Dorn-Curie auftretenden Elektrizitätsmenge ergaben.

Es konnten bei diesen Versuchen die Primärstromstärken nicht mehr wie früher *während* der Versuche abgelesen werden. Bei den Reihen VIII und IX wurden die aus den vielen früheren Versuchen bekannten Stellungen des Vorschaltwiderstandes benutzt und als Stromstärken die früher zu diesen Einstellungen gehörigen angegeben. Das dürfte wohl für die Reihe VIII stimmen, schlechter dagegen für die Reihe IX mit der weichen Röhre.

Bei den späteren Reihen wurden Stromstärke und Funkenstrecke durch Vorversuche ermittelt.

Bei den vorangehenden Versuchsreihen wurde häufig das Resultat aus *zwei ähnlichen* Versuchen mit unvollständiger Kompensation der Wärmewirkung ermittelt. Durch die von jetzt ab dazukommende Kompensation der Elektrometerspannung wurde der Einzelversuch zeitraubender und das alte Verfahren erwies sich in der folgenden Versuchsreihe VIII als unpraktisch. Deshalb wurden die Skalenteile der Galvanometerskala in mg-cal ausgewertet und die bei mangelhafter Kompensation auftretende Ablenkung dem Resultat als kleines Korrektionsglied hinzugefügt. Es ist dies ein kleiner aber prinzipieller Unterschied zwischen den vorangehenden und den folgenden Reihen: Dort wurde aus mehreren einzelnen Versuchen unter gleichen Bedingungen ein idealer konstruiert, hier zeigt sich, daß jeder Einzelversuch den Zusammenhang von elektrischer Wirkung und Bolometerenergie definiert, wenn auch mehrere Einzelversuche etwas voneinander abweichen.

Als Beispiel einer Versuchsreihe sei die kurze Reihe X aufgeführt:

Versuch Nr. 165.		Versuch Nr. 166.	
1,95 Amp.	2,5 cm Schlagw.	2,35 Amp.	3,5 cm Schlagw.
$^2/_{10}$ Mikrof.	700 Ω Rheostat	$^3/_{10}$ Mikrof.	20 Ω Rheostat
Galvanometer	**Quarz**	**Galvanometer**	**Quarz**
22,18	49 g	18,68	89 g
21,89	+ 1 Skt.	18,38	− 2 Skt.
21,83 Be-	(max. 5 Skt.)	18,05 Be-	(max. 3 Skt.)
21,82 strahlung	47 g	17,80 strahlung	92 g
21,45		17,58	

Versuch Nr. **167.**

2,55 Amp. 5,0 cm Schlagw.
$^{6}/_{10}$ Mikrof. 120 Ω Rheostat

Galvanometer		Quarz
17,90		159 g
17,72		−11,0 Skt.
17,50	Be-	(max. 15 Skt.)
17,15	strahlung	**179 g**
17,05		

Versuch Nr. **168.**

2,9 Amp. 9,0 cm Schlagw.
$^{9}/_{10}$ Mikrof. 100 Ω Rheostat

Galvanometer		Quarz
19,75		341 g
19,20		+15,0 Skt
18,35	Be-	(max. 15,0 Skt.)
20,20	strahlg.	**315 g**

Versuch Nr. **169.**

214 Volt.

3,3 Amp. 12,0 cm Schlagweite
$^{3}/_{10}$ Mikrof. 140 Ω Rheostat

Galvanometer		Quarz
16,32		323 g
16,73		−4,0 Skt.
17,25	Be-	(max. 20 Skt.)
13,80	strahlung	**330 g**

Die übrigen Reihen sind:

Versuchsreihe VIII. Samstag, 28. Januar 1905. Röhre I. Mittelhart, nicht absorbierter Teil der Strahlung (10 Proz.).[1]

Nr.	Ampère	Kapazität in Mikrof.	Gesamt-widerstand	Ausschlag des Galvano-meters	Energie mg-cal/sec	Quarz-belastung g
140	(2,2)	$^{1}/_{10}$	3100	0,0	0,0045	17
141	(2,75)	$^{2}/_{10}$	1600	− 2,6	0,0151	43
142	(2,75)	$^{2}/_{10}$	1700	− 3,4	0,0133	43
143	(3,1)	$^{5}/_{10}$	1200	−32,5	0,0305	83
144	(3,1)	$^{5}/_{10}$	1500	−20,0	0,0290	75
145	(3,1)	$^{4}/_{10}$	1100	−29,0	0,0260	70
146	(3,1)	$^{4}/_{10}$	1600	− 7,0	0,0287	68
147	(3,4)	$^{5}/_{10}$	1100	−17,0	0,0485	134
149	(3,7)	$^{6}/_{10}$	1100	+56,0	0,1213	258
150	(3,7)	$^{7}/_{10}$	1100	+56,0	0,1338	286
151	(3,7)	$^{9}/_{10}$	1100	+30,0	0,1380	335
152	(3,7)	$^{10}/_{10}$	1100	+15,0	0,1383	338
155	(3,9)	$4 . {}^{4}/_{10}$	1100	−12,0	0,2110	543
156	(4,15)	$4 . {}^{6}/_{10}$	1100	+62,5	0,3528	833
157	(4,15)	$4 . {}^{7}/_{10}$	1100	−35,0	$0{,}322_0$	899

1) Aus späteren Versuchen (p. 79) geschätzt nach der Durchsichtigkeit der Handknochen auf dem Fluoreszenzschirm.

Versuchsreihe IX. Sonntag, 29. Januar 1905. Röhre I. Die Röhre wurde für die Versuche so weich gemacht, daß sich das blaue Kathodenlicht zeigte. Leider arbeitete sie in diesem Zustande sehr ungleichmäßig, besonders wenn sie von dem Bleischirm umgeben war. Nicht absorbierter Teil der Strahlung (2 Proz.):

Nr.	Ampère	Kapazität in Mikrof.	Gesamt-widerstand	Ausschlag des Galvano-meters	Energie mg-cal / sec	Quarz-belastung g
158	(2,7)	$^{2}/_{10}$	1100	0,0	0,0251	90
159	(3,4)	$^{6}/_{10}$	1170	0,0	0,0708	208
160	(3,7)	$4 . ^{3}/_{10}$	1600	− 7,8	0,0970	303
161	(3,9)	$4 . ^{4}/_{10}$	1600	−15,3	0,1253	375
163	(4,15)	$4 . ^{3}/_{10}$	1100	+30,0	0,1755	490
164	(4,15)	$4 . ^{3}/_{10}$	1100	+70,0	0,2085	590

Versuchsreihe X. Montag, 30. Januar 1905. Röhre III von Siemens & Halske. Die Versuche wurden mit einer ganz neuen Röhre gemacht, welche leider nach dem letzten Versuch ihr Vakuum bis zur Bildung des roten positiven Lichtes verminderte. Nicht absorbierter Teil der Strahlung (5 Proz.):

Nr.	Ampère	Schlagw. cm	Kapazität in Mikrof.	Gesamt-widerstand	Ausschlag des Galvano-meters	Energie mg-cal/sec	Quarz-belastung g
165	1,95	2,5	$^{2}/_{10}$	1800	0,0	0,0153	47
166	2,35	3,5	$^{3}/_{10}$	1120	0,0	0,0370	92
167	2,55	5,0	$^{6}/_{10}$	1220	− 2,0	0,0663	179
168	2,90	9,0	$^{9}/_{10}$	1200	+27,0	0,1265	315
169	3,30	12,0	$4 . ^{3}/_{10}$	1240	−40,0	0,1005	330

Versuchsreihe XI. Dienstag, 31. Januar 1905. Röhre IV von Siemens & Halske. Gleichfalls eine ganz neue Röhre, welche nach jedem Versuch aufs neue weich gemacht wurde, derart, daß die Knochen der Hand auf dem Fluoreszenzschirm als fast strukturlose schwarze Schatten erschienen. Von dem Bleischirm umgeben arbeitete die Röhre äußerst ungleichmäßig.

Daher wurde der Schirm mit der Innenseite nach der Curieschen Röhre gekehrt und durch Kontrollversuche gezeigt, daß Bolometer und Elektrometer gegen die Strahlung trotzdem genügend geschützt sind. Nicht absorbierter Teil der Strahlung: 0 Proz.

Nr.	Ampère	Schlagw. cm	Kapazität in Mikrof.	Gesamtwiderstand	Ausschlag des Galvanometers	Energie mg-cal/sec	Quarzbelastung g
170	2,6	7,5	$^2/_{10}$	1100	−20,7	0,0076	38
171	2,6	7,5	$^1/_{10}$	1100	+ 2,8	0,0148	57
172	3,0	11,0	$^2/_{10}$	1100	−12,5	0,0137	54
173	3,0	11,0	$^2/_{10}$	1100	+ 7,5	0,0312	65
174	4,0	12,0	$^1/_{10}$	1100	+ 4,2	0,0160	46

Die mittlere Energie ist so gering, daß es scheint, als ob der größte Teil der Strahlen bereits in den Glaswänden der Röhre absorbiert werde.

In auffälliger Weise zeigte sich bei dieser Versuchsreihe, daß bei einem größeren Induktor die Schlagweite fast gar nicht von der Härte der Röhre, wohl aber von der Primärstromstärke abhängig ist, ferner daß die Primärstromstärke bei denselben Verhältnissen im Primärstromkreis um so größer ist, je weicher die Röhre ist. Die ausgestrahlte Energie endlich scheint hier mit der Primärstromstärke kaum in Zusammenhang zu stehen.

Versuchsreihe XII. Mittwoch, 1. Februar 1905. Röhre II, die inzwischen noch härter geworden war. Die Handknochen auf dem Fluoreszenzschirm noch gut durchsichtig. Nicht absorbierter Teil der Strahlung: 25 Proz.[1])

Nr.	Ampère	Schlagw. cm	Kapazität in Mikrof.	Gesamtwiderstand	Ausschlag des Galvanometers	Energie mg-cal/sec	Quarzbelastung g
175	2,7	5,5	$^1/_{10}$	1700	0,0	0,0082	25
176	3,3	10,5	$^4/_{10}$	1100	+ 6,0	0,0551	148
177	3,4	8,5	$4\,.\,^3/_{10}$	1260	−30,0	0,1065	350
178	3,5	—	$4\,.\,^4/_{10}$	1280	−41,0	0,1385	492
179	3,55	—	$4\,.\,^5/_{10}$	1330	+ 6,0	0,2139	785

1) Resultat des kurz darauf gemachten Versuches; vgl. p. 79.

Die vorstehenden Versuchsreihen wurden auf Taf. III, VIII bis XII graphisch dargestellt. Dabei ist zu bemerken, daß als Abszissen, wie bisher, die pro *Sekunde* die Bolometer treffenden Energien aufgetragen sind, als Ordinaten dagegen die zur Kompensation der Elektrizität in 15 Sek. benötigte Quecksilbermasse.

Die Versuchsreihen zeigen sämtlich eine bemerkenswerte Proportionalität der durch sekundäre Kathodenstrahlen entstehenden Elektrizitätsmenge mit der in den Bolometerstreifen in Wärme umgewandelten Strahlungsenergie.

Um die Resultate wegen des durch die Bolometer hindurchgehenden Teiles der Strahlung korrigieren zu können, war folgende Methode erdacht worden:

Von der Strahlung wird ein Teil, a, in den ersten beiden Bolometern absorbiert. Ein zweiter kleinerer, x, durchdringt die ersten Bolometer und gelangt erst in der Bleiplatte zur Absorption. Entfernt man nun die Bleiplatte, so findet die Strahlung x in dem zweiten Bolometerpaar eine ebenso starke Platinschicht vor, in der sie zum allergrößten Teile absorbiert werden dürfte. Da die Wärmewirkung in diesem zweiten Bolometerpaar eine Ablenkung des Galvanometers in der Brücke nach der entgegengesetzten Seite veranlaßt, so entspricht die Größe $a - x$ der bei diesem Versuch beobachteten Ablenkung — vorausgesetzt, daß bei beiden Versuchen die Röhre die gleiche Energie emittierte. Aus einem derartigen Paar von Versuchen kann $a + x$ berechnet werden.

Ein vorzügliches Mittel, die Gleichheit der Intensität der X-Strahlen bei zwei verschiedenen Versuchen festzustellen, bildete nun aber nach den vorhergehenden Untersuchungen der piezoelektrische Quarz, der in den folgenden Reihen nur zu diesem Zwecke benutzt wurde.

Die Idee der Absorptionsversuche läßt sich, wie folgt, präzisieren:

Erste Versuchsreihe: Es wird die zu n Quarzbelastungen gehörige, in zwei Bolometern entwickelte Wärmemenge a_1 bis a_n bestimmt — es wird also ein Stück einer der letzten Versuchsreihen wiederholt.

Zweite Versuchsreihe: Es wird die zu *denselben* Quarzbelastungen gehörige Wärmemenge $(a - x)_{1 \text{ bis } n}$ bestimmt.

Die Versuche wurden mit der ganz harten Röhre II angestellt.

Versuchsreihe XIII. Dienstag, 28. Februar 1905.

Nr.	Ampère	Schlagw. cm	Kapazität in Mikrof.	Gesamtwiderstand	Ausschlag des Galvanometers	Energie mg-cal/sec	Quarzbelastung g
180	3,2	10,0	$^{9}/_{10}$	1110	−13,3	0,1010	314
181	3,6	13,0	$4 . {}^{4}/_{10}$	1100	−44,0	0,1640	516
182	3,9	11,0	$4 . {}^{6}/_{10}$	1110	−44,2	0,2140	703
183	3,4	11,5	$4 . {}^{3}/_{10}$	1100	− 7,0	0,1447	458

Nach diesen Versuchen wurden sämtliche Bolometerkästen geöffnet und die Bleischeidewand entfernt.

Am folgenden Tage wurde die korrespondierende *Reihe XIV* beobachtet.

Nr.	Ampère	Schlagw. cm	Kapazität in Mikrof.	Gesamtwiderstand	Ausschlag des Galvanometers	Energie mg-cal/sec	Quarzbelastung g
184	3,4	10,0	$4 . {}^{3}/_{10}$	1200	−10,0	0,1295	430
185	3,7	8,0	$4 . {}^{4}/_{10}$	1190	0,0	0,1855	645
186	4,0	12,0	$4 . {}^{5}/_{10}$	1100	+21,0	0,2690	900
187	3,5	13,0	$4 . {}^{3}/_{10}$	1200	+28,0	0,1615	540

Die Resultate der beiden Versuchsreihen lassen sich am besten überblicken, wenn man die graphische Darstellung zu Hilfe nimmt: Taf. V, Fig. XIII u. XIV.

Hier sieht man, daß bei der zweiten Reihe zu denselben Quarzbelastungen kleinere Wärmemengen gehören, als bei der ersten. Das Verhältnis der Wärmemengen (der Abszissen) gibt direkt den aus diesen Versuchen bestimmten Absorptionskoeffizienten. — So wurde der nicht absorbierte Teil der Strahlung zu 5 Proz. berechnet. Eine Beobachtung mit dem Fluoreszenzschirm zeigte jedoch, daß ein Teil der Strahlen auch durch das zweite Bolometerpaar hindurchging.

Es mußte daher ein anderer Weg zur Bestimmung des Absorptionskoeffizienten eingeschlagen werden. In Betracht kamen hauptsächlich Methoden, bei denen die Wirkung durch einen kleinen, aliquoten Teil der *X*-Strahlen hervorgebracht wird. Von diesem schien es am aussichtsvollsten, den Strom, welcher durch *Bestrahlung einer Luftschicht zwischen zwei Kondensatorplatten* entsteht, zu den Messungen zu benützen.

Ein Kondensator wurde hergestellt aus zwei Messingplatten von 90 × 90 mm Seitenlänge. Die Luftschicht zwischen denselben war etwa 3 cm dick. Die Platten waren auf Paraffin montiert und wurden in einen Kasten aus Weißblech gehängt, der eine schlitzförmige, mit Aluminiumfolie verschlossene Öffnung besaß.

Für die Messungen wurde der Kasten ähnlich wie die Dorn-Curiesche Röhre durch den starken Bleischirm mit quadratischer Öffnung vor Bestrahlung geschützt.

Die eine Platte des Kondensators war mit einem Hochspannungsakkumulator verbunden, dessen zweiter Pol durch einen Lampenwiderstand hindurch zur Erde abgeleitet war. Von der zweiten Kondensatorplatte führte die Leitung durch ein Drehspulengalvanometer von $6 . 10^{-10}$ Amp./Skt. Empfindlichkeit zur Erde.

Zunächst wurde konstatiert, daß während der Bestrahlung des Kondensators im Galvanometer kein Strom zu beobachten war, wenn keine Potentialdifferenz zwischen den Platten herrschte. Dann wurde das Potential der Kollektorplatte um je 100 Volt vergrößert bis der Ionisationsstrom sein Maximum erreicht hatte (Sättigungsstrom). Dies fand statt bei 400 Volt. Die Messungen wurden bei 500 Volt Kondensatorspannung ausgeführt.

Die Versuchsanordnung war so getroffen worden, daß die Stärke des durch die *X*-Strahlen ausgelösten Ionisationsstromes mit ihrer bolometrisch gemessenen Energie verglichen werden konnte. Denn nur, wenn sich der Ionisationsstrom dieser Energie proportional erwies, durfte er später als Maß für ihre Intensität benutzt werden.

Bei der folgenden Versuchsreihe, welche den linearen Zusammenhang bewies, wurde mit Röhre I gearbeitet und wegen

der großen Schwingungsdauer des Drehspulengalvanometers 30 Sek. exponiert.

Versuchsreihe XV.

Nr.	Ampère	Schlagweite cm	Kapazität in Mikrof.	Gesamtwiderstand	Ausschlag des Galvanometers	Energie mg-cal/sec	Ionisationsstromstärke Skt.
188	2,5	—	$^4/_{10}$	1100	+ 3,5	0,0530	37,0
189	3,7	—	$4 . ^4/_{10}$	1100	− 3,0	0,2010	143,0
190	3,8	—	$4 . ^5/_{10}$	1100	−42,0	0,2160	162,0
191	3,8	—	$4 . ^6/_{10}$	1240	0,0	0,2670	180,0
192	3,2	—	$4 . ^3/_{10}$	1300	+ 1,0	0,1280	90,0

Trägt man die mg-cal als Abszissen, die Ionisationsstromstärken als Ordinaten auf, so resultiert eine *Gerade.* Taf. V, Kurve XV.

Danach schien es berechtigt, den Strom in ionisierter Luft zu Messungen der Absorption der *X*-Strahlen in den Bolometern zu verwenden.

Es wurden nun die beiden den *X*-Strahlen ausgesetzten Bolometer von ihren Verbindungen gelöst und zusammen in ein dünnes Kuvert gesteckt. Auf eine Bestimmung der Ionisationsstromstärke wie bisher folgte jetzt eine andere, bei der die Bolometer in den Weg der Strahlen gehalten wurden. Hierauf kam eine Kontrollmessung ohne und eine zweite mit den vorgehaltenen Bolometern.

Aus diesen Versuchen berechnet sich eine Absorption der aus der Röhre austretenden Strahlen von 90 Proz.

Derselbe Absorptionsversuch wurde dann noch mit der ganz harten Röhre II gemacht, leider ohne daß vorangehend eine Vergleichung des Ionisationsstromes mit der Absorptionsenergie mehr möglich gewesen wäre. Der Versuch ergab in derselben Weise eine Absorption von 75 Proz.

Vierter Teil.

Um den *Effekt* der *X*-Strahlen, ihre Energie pro Zeiteinheit zu bestimmen, war es erforderlich, die Zeit zu kennen, während der bei jeder Entladung des Induktors *X*-Strahlen von der Antikathode emittiert werden.

Derartige Bestimmungen waren schon mehrfach gemacht worden, ergaben aber bei den einzelnen Beobachtern sehr verschiedene Resultate. Es ist wahrscheinlich, daß diese Emissionsdauer von der Größe und Bauart des Induktors, von der Kapazität von Röhre und Zuleitungen, von der Art der Unterbrechungen und anderen Umständen abhängt, und deshalb wurde dieselbe für die benutzte Versuchsanordnung neu bestimmt.

Es stand uns für diesen Zweck ein Apparat zur Verfügung, der im wesentlichen aus einer Stahlscheibe bestand, die mittels vieler Zahnräder durch zwei schwere Kurbeln in schnelle Rotation versetzt werden konnte.

Die Stahlscheibe hat einen Radius von 123 mm und ist 18 mm breit. Das Übersetzungsverhältnis wurde zu 600 ermittelt, ihre maximale Peripheriegeschwindigkeit zu 38,6 m/sec bestimmt.

Um diese Maschine für die Versuche verwenden zu können, wurde sie von einem lichtdichten Messingkasten umschlossen. Der höchste Teil der Stahlscheibe war nur einige Millimeter unter dem Deckel des Kastens.

Auf dem Deckel wurde ein 3 mm starkes Bleiblech befestigt, welches senkrecht über der Drehungsachse der Stahlscheibe einen etwa 0,7 mm breiten Spalt erhielt.

Unmittelbar über dem Bleiblech wurde die *X*-Strahlenröhre montiert, so daß ihre Antikathode möglichst genau in die Richtung Drehungsachse ➢ Spalt zu liegen kam.

Zur Ausführung eines Versuches wurde von dem zur Verwendung kommenden Film ein schmaler Streifen abgeschnitten, mit einem Klebemittel flüchtig an die Stahlscheibe angeheftet und nach einer Umdrehung derselben seine Enden auf einer Strecke von 5—10 cm sorgfältig bei rotem Licht zusammengeleimt. Das obere Ende, das im Sinne der Rotationsrichtung zuletzt kam, wurde schiefwinklig abgeschnitten, um später die Bewegungsrichtung erkennen zu lassen. Wenn nach einigen Minuten die Enden fest verklebt waren, wurde der Deckel aufgeschraubt und die Scheibe in Rotation gesetzt.

Es schien wünschenswert, die Entladungsdauer unter möglichst ähnlichen Umständen zu studieren, unter denen die bisherigen Untersuchungen gemacht worden waren. Deshalb lief z. B. auch während dieser Versuche der Umschalter auf dem Turbinenunterbrecher mit, weil er vielleicht die Rotationsgeschwindigkeit desselben etwas beeinflußte.

Wenn die Scheibe eine passende Umdrehungszahl hatte, wurde mit dem Pedalausschalter der Primärkreis des Induktors möglichst kurze Zeit geschlossen. Da die Entladungen in Abständen von $^1/_{107}$ Sek. einander folgten, so kamen immer mehrere (5—10) Spaltbilder auf den Film, aus deren gleichmäßigen Abständen am besten die Filmgeschwindigkeit bestimmt werden konnte.

Die Größenordnung der Rotationsgeschwindigkeit des Films wurde außerdem aus der Dauer einer Viertelkurbelumdrehung bestimmt.

Zur Berechnung der Emissionsdauer wurden vier Filmstreifen ausgemessen, von denen Taf. VI, Film 2 und 3 zeigt.

Film 1 wurde nur exponiert, um die Breite des Spaltes zu bestimmen. Die Scheibe rotierte bei dieser Aufnahme so langsam, daß die Verbreiterung des Spaltbildes vernachlässigt werden darf. Es fand bei diesem Versuch ein langsam arbeitender Unterbrecher Verwendung.

Die Breite b der Spaltbilder wurde unter dem Mikroskop ausgemessen und zu 0,81 mm (Mittel aus 7 Messungen) bestimmt.

Die übrigen Films sind bei jedesmal gesteigerter Rotationsgeschwindigkeit der Stahlscheibe exponiert. Die Bewegungsrichtung ist auf Taf. VI von rechts nach links zu denken.

Diese Aufnahmen zeigen eine unerwartete Anomalie: Kurz nach einer Entladung folgt fast immer, viermal unter fünf Bildern, eine zweite, schwächere.

Es schien möglich, daß diese Nebenentladungen bei einem länger dauernden Betrieb der Röhre verschwinden würden. Um dies zu untersuchen, wurde über dem Spalt ein Rahmen aus Blei angebracht, der beim Auslösen einer Sicherung durch eine Feder verschoben wurde, so daß etwa $^1/_{10}$ Sek. lang der Spalt der *X*-Strahlung ausgesetzt war. Versuche, die 5 und 10 Sek. nach dem Ingangsetzen der Röhre gemacht wurden, ergaben, daß die Begleiter zwar schwächer und seltener wurden, daß sie aber doch immer noch vorhanden waren.

Um zu untersuchen, ob die Begleiter durch die Eigenart der Unterbrechung bedingt wären, wurde der Turbinenunterbrecher durch einen Motorunterbrecher von Voltohm ersetzt. Die so gewonnenen Bilder der Entladungen auf dem Filmstreifen waren jedoch von den früheren nicht verschieden.

Die zweite Entladung dürfte demnach bei allen vorhergehenden Versuchen dabei gewesen sein und deshalb muß sie bei der Bestimmung der Emissionsdauer so gut als möglich in Rechnung gezogen werden.[1])

Der Zwischenraum s zwischen zwei Entladungen beträgt, wie erwähnt, $^1/_{107}$ Sek. In dem Maße, wie dieser Zwischenraum zunimmt, muß auch die Verbreiterung der Spaltbilder wachsen.

Die auf den Films abgemessenen Größen sind:

1. Breite der Spaltbilder auf dem ruhenden Film:

$$b = 0{,}81 \text{ mm}$$

2. Breite der Spaltbilder auf dem bewegten Film:

Erste Entladung:

$$b_2 = 1{,}74 \text{ mm} \mid b_3 = 3{,}08 \text{ mm} \mid b_4 = 4{,}35 \text{ mm}.$$

Zweite Entladung:

$$b_2' = 1{,}25 \text{ mm} \mid b_3' = 2{,}29 \text{ mm} \mid b_4' = 3{,}50 \text{ mm}.$$

1) Hr. Geheimrat Röntgen hatte die Güte, mir mitzuteilen, daß er 1897 bei ähnlichen Untersuchungen gleichfalls diese Verdoppelung bei einigen Entladungen gefunden habe — die demnach bei ganz verschiedenen Versuchsanordnungen vorkommen und bei manchen Arbeiten mit *X*-Strahlen zu berücksichtigen sein dürften.

3. Zwischenraum s zwischen zwei Entladungen:

$$s_2 = 37{,}6\text{ mm} \mid s_3 = 66{,}0\text{ mm} \mid s_4 = 98{,}3\text{ mm}.$$

Aus diesen Daten berechtnet sich die Emissionsdauer x aus:

Film 2: $x = 2{,}3 \cdot 10^{-4}$ Sek.
Film 3: $x = 3{,}36 \cdot 10^{-4}$ „
Film 4: $x = 3{,}34 \cdot 10^{-4}$ „

Die abweichenden Resultate von Film 2 sind auf die minimale Verbreiterung zu schieben. Das Mittel dürfte etwa $3{,}3 \cdot 10^{-4}$ Sek. sein.

Die Zeit, die von dem Maximum einer Hauptentladung bis zu dem Maximum ihrer Nebenentladung verstreicht, wurde aus der Filmlänge für $^1/_{107}$ Sek. ermittelt. Es folgte aus

Film 2: $7{,}4 \cdot 10^{-4}$ Sek.
Film 3: $6{,}9 \cdot 10^{-4}$ „
Film 4: $7{,}8 \cdot 10^{-4}$ „
} im Mittel: $7{,}7 \cdot 10^{-4}$ Sek.

Für die Nebenentladungen ergaben die Berechnungen eine Emissionsdauer von $2{,}0 \cdot 10^{-4}$ Sek.

Vergleicht man diese aus den Films berechneten Emissionszeiten mit der Zeit, in welcher der früher beschriebene Heizstrom der Bolometer abklingt (vgl. Taf. III, Fig. 2, wo das schraffierte Gebiet die Dauer der X-Strahlenmission bedeutet), so findet man, daß die Größenordnung dieser beiden Aktionszeiten die gleiche ist.

Um einen Mittelwert der Zeit anzugeben, in der die X-Strahlenenergie einer Entladung ausgestrahlt wird, kann man vier Entladungen zu $5{,}3 \cdot 10^{-4}$ Sek. rechnen, die fünfte jeweils zu $3{,}3 \cdot 10^{-4}$ Sek. (weil ohne Nebenentladung). So erhält man das Mittel $5{,}0 \cdot 10^{-4}$ Sek.

Die photographischen Resultate können jedenfalls nur einen *Mittelwert* der Entladungsdauer geben, sie können nur dazu dienen, ihre Größenordnung zu schätzen. Die photographische Wirkung war so schwach, daß der stärkste Primärstrom genommen wurde, der Verwendung finden durfte. Ob bei den bedeutend schwächeren X-Strahlen, mit denen in einem

großen Teile der Untersuchung gearbeitet wurde, die Emissionsdauer nicht kleiner ist, konnte nicht bestimmt werden.

Die Resultate dieser Arbeit lassen sich in folgender Weise zusammenstellen:

1. Die bei der Absorption der *X*-Strahlen entstehende Wärmemenge ist deutlich nachweisbar.

2. Die durch die Erwärmung zweier Zweige der Wheatstoneschen Brückenschaltung mittels *X*-Strahlen hervorgerufene Galvanometerablenkung läßt sich durch die Erwärmung entsprechender Zweige mittels eines Heizwechselstromes aus Kondensatorentladungen vollständig kompensieren und dadurch messen.

3. Die emittierte *X*-Strahlenenergie wächst viel schneller als die Energie des Primärstromes des Induktors. Der höchste Wert der Strahlung wurde bei der Betriebsspannung des Induktors 110 Volt und der Primärstromstärke 4,15 Ampères beobachtet. Die Reduktion der dabei gemessenen *X*-Strahlenenergie auf die gesamte, von der Antikathode ausgehende Strahlung sowie auf eine einzelne Entladung ergibt — in Übereinstimmung mit dem Werte Dorns —

0,30 mg-cal.

4. Von der in der *X*-Strahlenröhre verbrauchten elektrischen Energie wird etwa $^1/_{3500}$ in *X*-Strahlenenergie verwandelt.

5. Die in der Dorn-Curieschen Röhre durch *X*-Strahlen erzeugte Elektrizitätsmenge ist proportional der bolometrisch gemessenen Energie dieser *X*-Strahlen.

6. Bei einer Unterbrechung des Primärstromes emittiert die Antikathode die *X*-Strahlung häufig in zwei Intervallen, die durch eine meßbare Zeit getrennt sind. Die gesamte Emissionsdauer wurde zu etwa 5×10^{-4} Sek. bestimmt.

7. Aus 3. und 6. berechnet sich der beobachtete Maximaleffekt der *X*-Strahlen zu 0,51 g-cal pro Sekunde.

Als die vorliegende Arbeit eben eingereicht war, erschien in der Festschrift für Prof. Wüllner eine Publikation von Prof. Wien, in welcher mehrere der hier behandelten Fragen gelöst sind.[1])

Das Instrumentarium, dessen sich Wien bediente, ist ähnlich dem hier gebrauchten. Das Induktorium hat eine Schlagweite von 40 cm und wird mit einem Turbinenunterbrecher benutzt. Das verwendete Glockengalvanometer hat 6 Ω inneren Widerstand und $2 \cdot 10^{-9}$ Amp./Skt. Empfindlichkeit. Die Bolometer waren ähnlich wie die bei dieser Arbeit gebrauchten. Doch kam außerdem eine Thermosäule zur Anwendung, nachdem sich die Rutherfordschen Einwände (vgl. p. 11) haltlos erwiesen hatten.

W. Wien verwendet die mit Wasserkühlung versehene Antikathode als Kalorimetergefäß und bestimmt so die Größenordnung der in Kathodenstrahlen verwandelten elektrischen Energie. — Er findet für die Gesamtstrahlung bei einer Entladung

0,05 mg-cal.

Endlich werden noch mit der auch von uns angewandten Curieschen Röhre eingehende Versuche über das Verhältnis der *X*-Strahlenenergie zu der Energie der sekundären Kathodenstrahlen gemacht.

1) Vgl. W. Wien, Ann. d. Phys. **18.** p. 991. 1905.

Lebenslauf.

Ernst Angerer, der Verfasser der vorliegenden Arbeit, ist der Sohn des Universitätsprofessors Angerer in München.

Er wurde 1881 in Würzburg geboren und absolvierte 1900 das humanistische Theresien-Gymnasium in München. Dann widmete er sich dort an der Ludwig-Maximilians-Universität dem Studium der Physik.

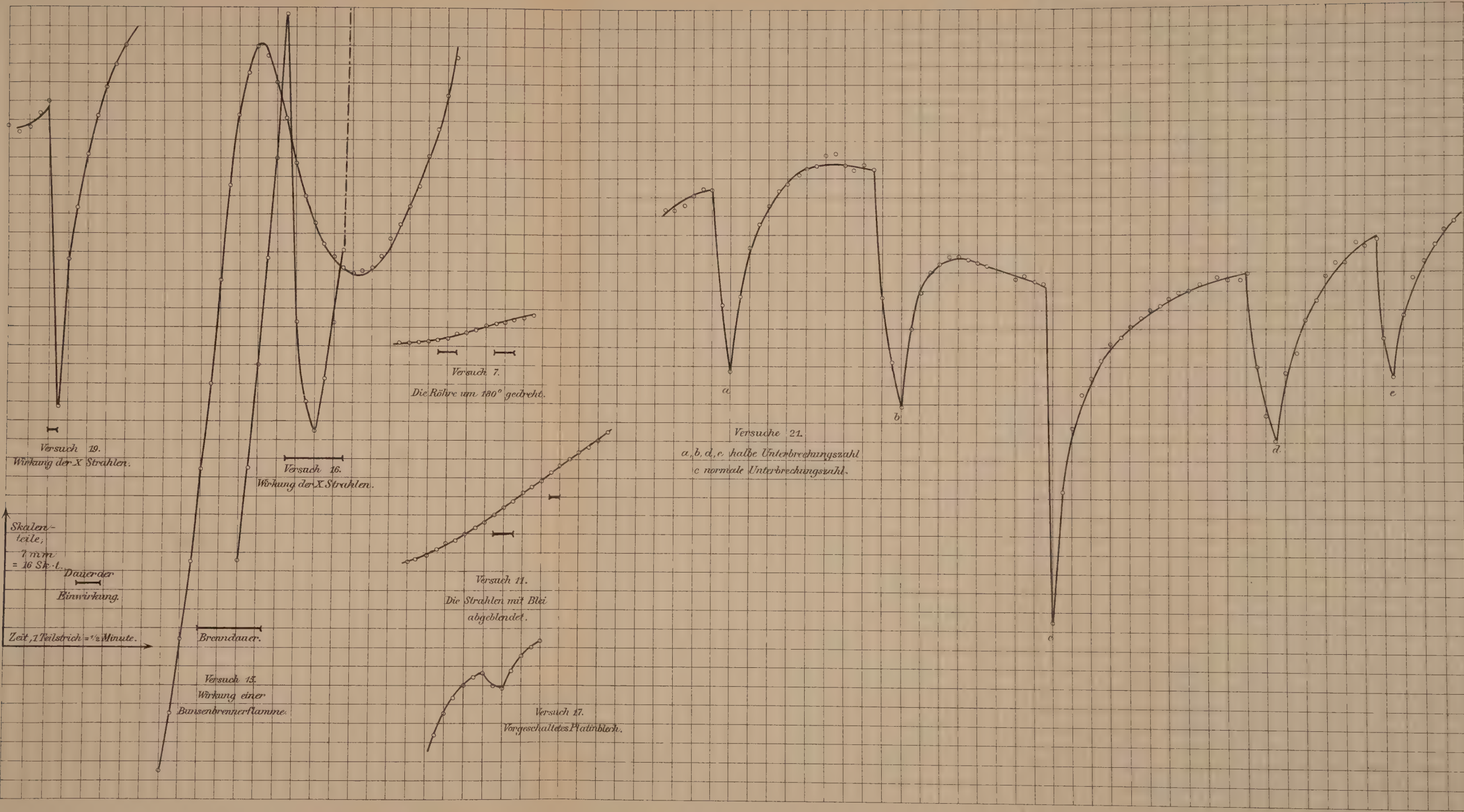

Versuch 19.
Wirkung der X Strahlen.
Versuch 7.
Die Röhre um 180° gedreht.
Versuche 21.
a, b, d, e halbe Unterbrechungszahl
c normale Unterbrechungszahl.
a
b
c
d
e
Versuch 16.
Wirkung der X Strahlen.
Skalen-
teile,
7 mm
= 16 Sk·t.
Dauer der
Einwirkung.
Zeit, 1 Teilstrich = ½ Minute.
Brenndauer.
Versuch 13.
Wirkung einer
Bunsenbrennerflamme.
Versuch 11.
Die Strahlen mit Blei
abgeblendet.
Versuch 17.
Vorgeschaltetes Platinblech.

Fig. 1.

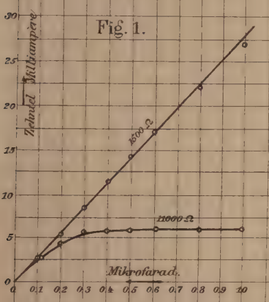


Fig. 2.

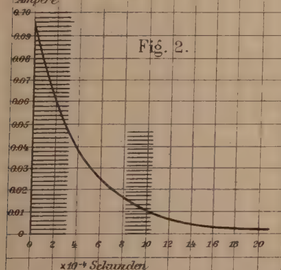


Fig. 4.

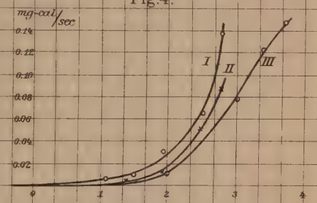


Fig. 5.

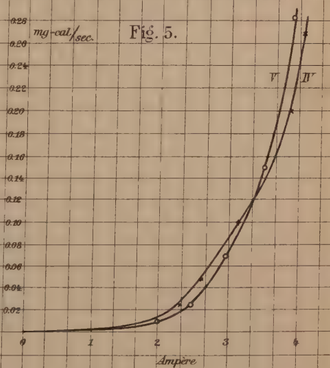


Fig. 6.

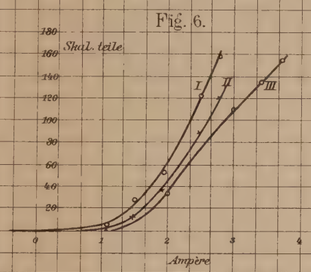


Fig. 7.

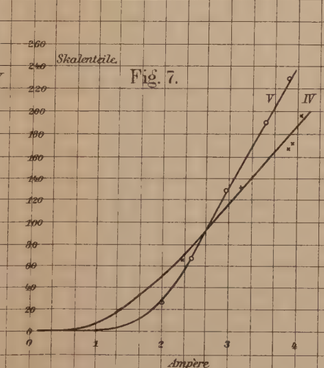


Fig. 3.

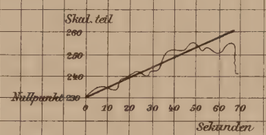


Fig. 8.

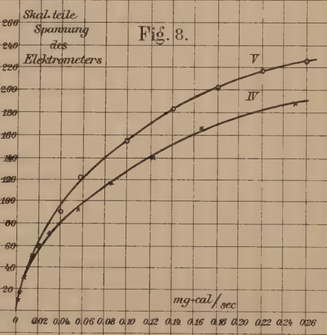


Fig. 9.

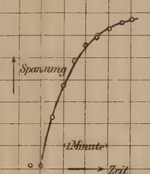


Fig. 10.

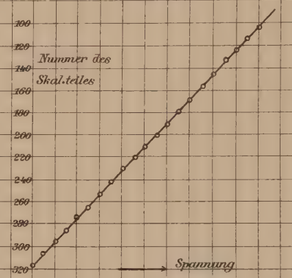
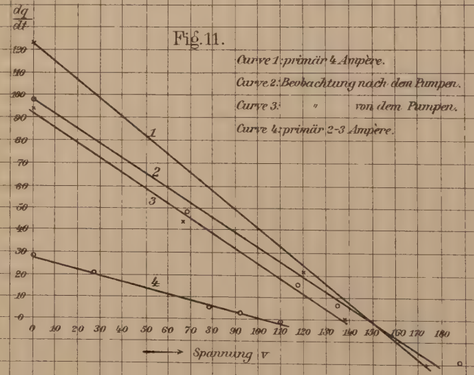


Fig. 11.



Curve 1: primär 4 Ampère.
Curve 2: Beobachtung nach dem Pumpen.
Curve 3: " von dem Pumpen.
Curve 4: primär 2-3 Ampère.

Fig. 12.

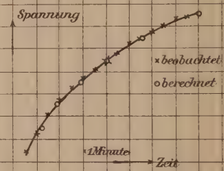
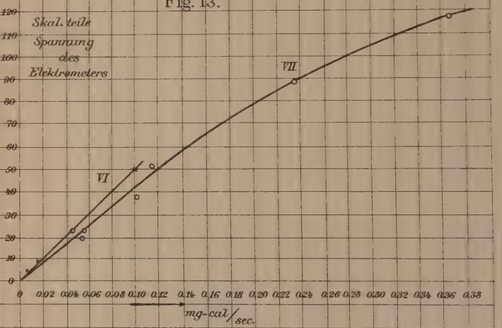
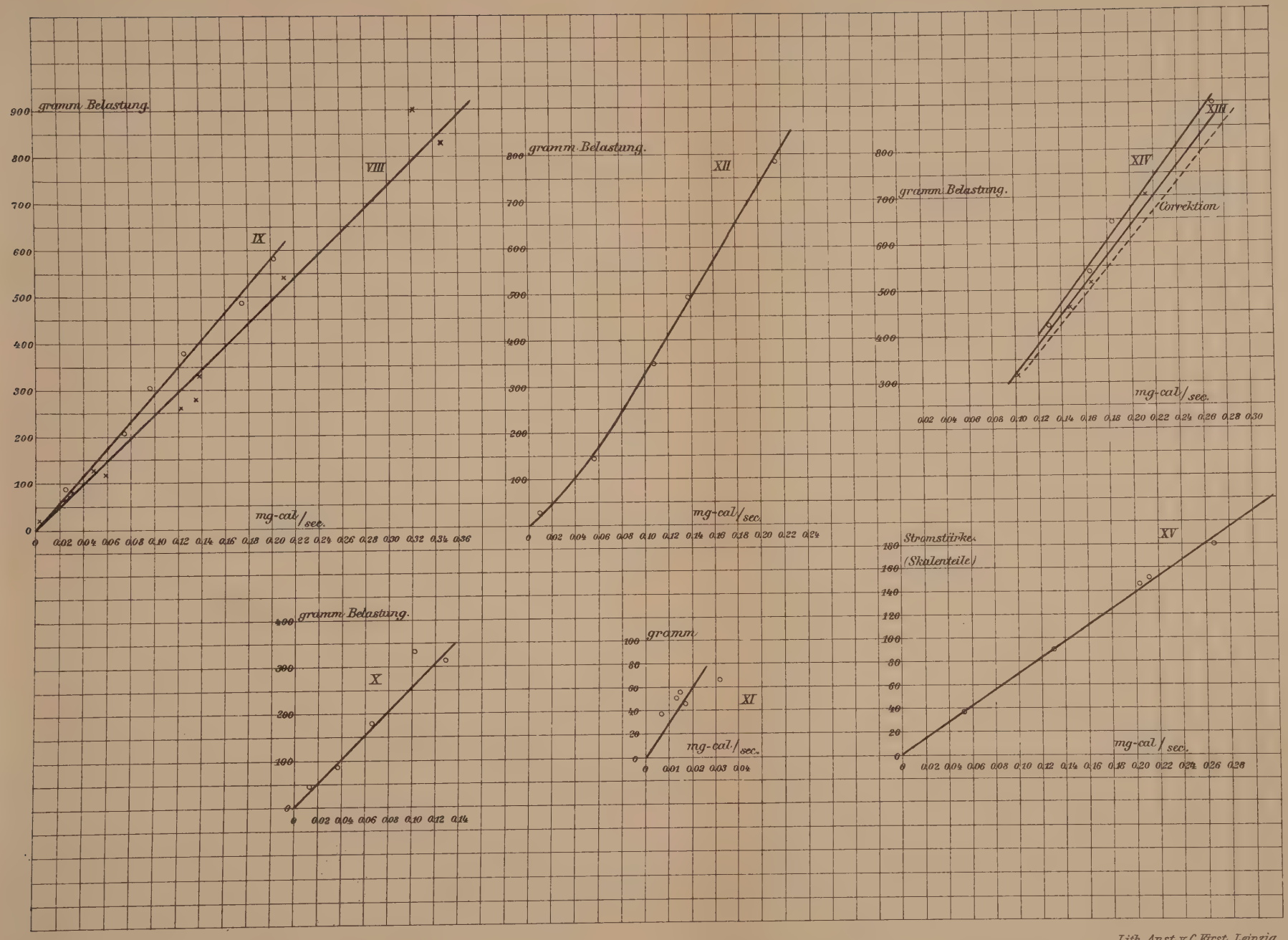
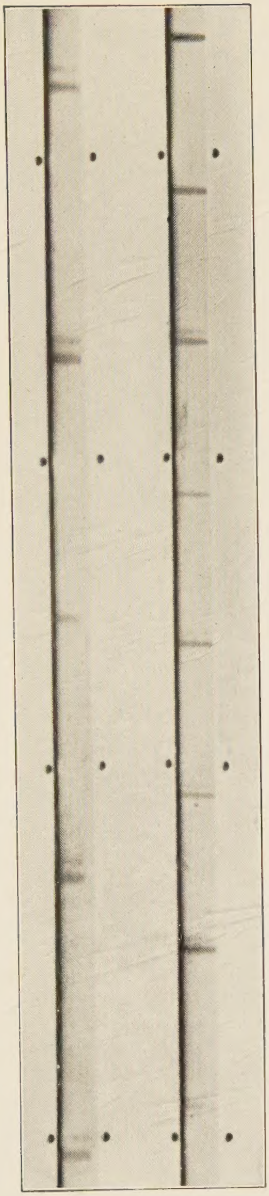


Fig. 13.





Lith. Anst. v. C. Kirst, Leipzig.



Film 2 u. 3.